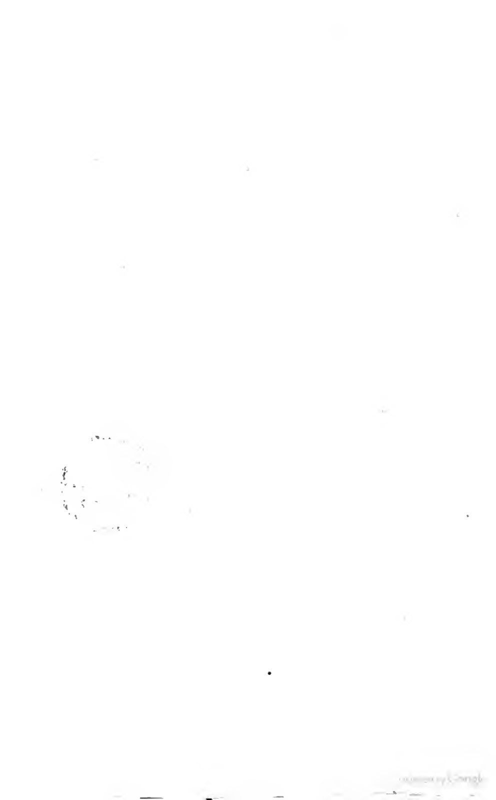



FONDO PIZZOFALCONE





TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

I



CET OUVRAGE SE TROUVE AUSSI

A GENÈVE

CHEZ JOËL CHERBULIEZ, LIBRAIRE

Rue de la Cité

Paris. — Imprimerie de Gustave GRATIOT, 30, rue Mazarine.

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

PAR

A. DE LA RIVE

PROFESSEUR ÉMÉRITE DE L'ACADÉMIE DE GENÈVE, DOCTEUR HONORAIRE DE L'UNIVERSITÉ DE PRAGUE
CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ET DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE DE PARIS;
ASSOCIÉ ÉTRANGER DE LA SOCIÉTÉ ROYALE DE LONDRES;
DES ACADÉMIES DE BERLIN, DE TURIN, DE BRUXELLES ET DE NAPLES;
MEMBRE DES SOCIÉTÉS DES ARTS ET DES SCIENCES NATURELLES DE GENÈVE, ETC.

Avec figures intercalées dans le texte



TOME PREMIER

A PARIS
CHEZ J.-B. BAILLIÈRE
LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE IMPÉRIALE DE MÉDECINE
RUE HAUTEFEUILLE, 19
A LONDRES, CHEZ H. BAILLIÈRE, 219, REGENT STREET
A NEW-YORK, CHEZ H. BAILLIÈRE, 290, BROADWAY
A MADRID, CHEZ C. BAILLY-BAILLIÈRE, CALLE DEL PRINCIPE, 11

1854



PRÉFACE

Il y a à peine un siècle que l'électricité n'était qu'un modeste chapitre des traités de physique. La bouteille de Leyde venait, il est vrai, d'être découverte; il était déjà permis d'entrevoir la puissance de l'étincelle électrique. Toutefois, Franklin n'avait point encore établi l'identité entre la foudre et l'électricité. On savait seulement que certains corps deviennent capables, après avoir été frottés, d'exercer une attraction autour d'eux; qu'il y a des substances conductrices et d'autres non conductrices de l'électricité; qu'il y a dans l'électricité deux principes différents qui s'attirent, tandis que ceux qui sont semblables se repoussent; que la réunion des deux principes opposés donne lieu à des étincelles dont la puissance peut acquérir un degré d'énergie remarquable au moyen d'appareils particuliers.

Voilà à quoi se bornaient encore, en 1750, les connaissances des savants sur l'électricité. Qui aurait cru alors que la météorologie ne tarderait pas à y aller chercher la cause des grands phénomènes de l'atmosphère; que la chaleur lui emprunterait ses instruments les plus parfaits et les moyens de mettre en évidence ses lois les plus importantes; que la physique moléculaire s'en servirait pour pénétrer dans la constitution intime des corps, et la ferait concourir

avec la lumière polarisée à la manifestation des rapports qui existent entre la matière pondérable et l'éther impondérable; que la chimie lui devrait la découverte de nouveaux éléments, la formation de nouveaux composés, ses moyens d'analyse et de synthèse les plus puissants et ses théories les plus satisfaisantes; que la minéralogie et la géologie y trouveraient en grande partie l'explication de l'origine de leurs cristaux et de leurs couches; que la physiologie y puiserait la connaissance plus intime des forces qui régissent la matière organique et le secret d'agir sur cette matière presque comme la vie; que la médecine y rencontrerait des ressources contre des maux jugés jusqu'alors incurables; que les arts métallurgiques y découvriraient des procédés nouveaux pour extraire, mouler et appliquer les métaux; qu'enfin elle fournirait à la mécanique une force qui, prompte comme la pensée, indépendante du temps comme de l'espace, permettrait à l'intelligence de sortir de son enveloppe limitée pour s'élancer au gré de ses désirs, avec la rapidité de l'éclair, dans les régions les plus lointaines?

Telles sont cependant les merveilles que l'électricité a accomplies dans moins d'un siècle; tels sont les liens qui l'unissent maintenant d'une manière indissoluble à toutes les autres parties des sciences physiques. Aussi son étude est-elle devenue indispensable à tous ceux qui cultivent ces sciences : au chimiste aussi bien qu'au physicien, au géologue tout autant qu'au physiologiste, à l'ingénieur comme au médecin. Tous sont appelés à rencontrer l'électricité sur leur route; tous ont besoin par conséquent de se familiariser avec elle. Ce besoin universellement senti m'a fait croire qu'on accueillerait avec faveur un ouvrage ayant pour but de le satisfaire. Quoiqu'il existe déjà des Traités spéciaux d'électricité et malgré tout le mérite du Traité si complet et si remarquable de M. Becquerel, il en manquait un qui

remplit d'une manière plus précise le but complexe que je viens d'indiquer. En effet, pour initier à l'étude de l'électricité toute la catégorie des hommes d'art et de science auxquels elle est nécessaire, il faut une exposition à la fois substantielle et élémentaire, complète et abrégée; il faut que le sujet soit présenté dans un ordre logique, et non pas comme on l'a fait jusqu'à présent, dans un ordre presque purement historique; il faut, en un mot, donner à cette partie de la physique comme aux autres ce caractère d'une véritable science qui lui manquera toujours tant qu'elle restera une simple compilation, le plus souvent confuse, de théories hasardées et de faits sans liaison.

Je viens de faire connaître, par ce qui précède, l'esprit dans lequel j'ai cherché à rédiger l'ouvrage que je livre aujourd'hui à la publicité. Je n'ai point voulu en faire un traité pour les gens du monde, quoique je me sois efforcé de le rendre abordable à tous ceux qui ont reçu une culture intellectuelle un peu développée. J'ai tenu à m'adresser essentiellement aux hommes qui cultivent les sciences et qui, par conséquent, en connaissent déjà le langage et les procédés; mais, en même temps, je n'ai point supposé chez eux une connaissance préalable plus approfondie de telle ou telle branche scientifique particulière. C'est ainsi que j'ai relégué, dans quelques notes spéciales placées à la fin de chaque volume, les développements mathématiques dont certains points particuliers sont susceptibles, mais qui ne sont nullement indispensables à l'intelligence de l'ensemble.

Il me reste à exposer l'ordre que j'ai suivi, et à le justifier par un coup d'œil rapide jeté sur le vaste sujet auquel est consacré le *Traité d'Électricité*.

Envisagée dans les progrès successifs qu'elle a éprouvés, l'électricité offre une si prodigieuse variété de faces scientifiques que l'esprit risque de s'y perdre, quand, suivant

l'ordre historique, il est le plus souvent obligé de les contempler presque toutes à la fois. Tandis qu'il poursuit avec Coulomb la recherche des lois auxquelles est soumise l'électricité statique, il est appelé à scruter avec Galvani les mystères de l'électricité animale, et à marcher avec Volta à la découverte de la pile. Puis bientôt, pendant qu'il cherche à comprendre les beaux calculs sur lesquels Poisson fonde les théories de l'électricité, il est saisi d'admiration à la vue des résultats aussi magnifiques qu'imprévus que Davy tire de la pile de Volta. Mais c'est à partir de l'année 1820, si remarquable dans l'histoire des sciences par la découverte d'Oersted, que la tâche de celui qui veut suivre jour à jour le mouvement imprimé à l'électricité devient encore plus difficile. D'abord il assiste à la création de cette branche toute nouvelle des sciences qui comprend, sous le nom d'*électro-dynamique*, les lois générales de l'électricité en mouvement. L'étude pleine d'intérêt qu'il fait des travaux des Arago, des Ampère, des Faraday, les créateurs de cette partie de la physique, est constamment interrompue par des découvertes d'un ordre tout différent. C'est Seebeck qui trouve les courants thermo-électriques; c'est Becquerel, c'est Nobili qui les analysent en même temps qu'ils créent l'électro-chimie. C'est Marianini, Matteucci et Dubois-Reymond qui, reprenant les travaux de Galvani et de Volta sur l'électricité animale, donnent à cette partie de la physiologie un développement qui menace de l'envahir tout entière. Ce sont des travaux sur la théorie de la pile et ses effets que mettent au jour un grand nombre de physiciens tels que Ohm, Pouillet, Fechner, Faraday, etc., parmi lesquels figure aussi l'auteur lui-même du présent traité. C'est une succession non interrompue de nouvelles recherches sur les phénomènes magnétiques, chimiques, calorifiques et lumineux que produisent les courants et les décharges électriques, ainsi que sur les applications dont ces propriétés de l'électricité

sont susceptibles. C'est enfin une étude faite à la fois par divers physiciens, des sources de l'électricité et des lois qui les régissent. Ce sont tous les jours de nouveaux noms venant apporter à la science de l'électricité leur contingent de découvertes, et des noms anciens qui ne cessent de lui fournir le leur. C'est Becquerel reparaissant à tout instant avec les résultats aussi variés que nombreux qu'il tire de son galvanomètre. C'est Faraday lançant dans le monde savant, après les courants d'induction, le diamagnétisme et toutes les productions de son génie créateur.

Cet aperçu, bien imparfait et bien rapide de ce que serait une exposition chronologique des théories et des phénomènes dont l'électricité s'est enrichie depuis un siècle, suffit pour montrer la confusion qui résulterait, dans la tête même la mieux organisée, de cette façon d'en aborder l'étude. Il est donc indispensable, pour que cette étude soit faite d'une manière intelligente et approfondie, d'y introduire une classification méthodique qui, en groupant sous le même chef les phénomènes du même ordre, en facilite l'explication et le souvenir. C'est l'essai que j'ai tenté.

L'examen des phénomènes électriques y fait découvrir assez vite deux points de vue très-distincts, dont l'un comprend les lois générales auxquelles l'électricité est soumise, soit à l'état de repos, soit à l'état de mouvement, et dont l'autre embrasse les effets variés qui proviennent de l'action des différents corps sur l'électricité et de l'action de l'électricité sur ces corps. Dans le premier point de vue la substance pondérable ne servant qu'à la manifestation des propriétés générales de l'agent électrique, sa nature particulière importe peu; il suffit qu'elle soit isolante ou conductrice, magnétique ou non-magnétique. Dans le second point de vue, le corps joue le principal rôle; par conséquent sa constitution physique et chimique exerce une influence prépondérante sur sa relation avec l'électri-

cité. De ces deux aspects si différents, sous lesquels on peut envisager l'étude de l'électricité, découle évidemment la nécessité de grouper séparément, pour faire cette étude, les faits qui appartiennent à l'une des catégories et ceux qui appartiennent à l'autre. Les sources et les applications de l'électricité forment aussi deux parties à la fois bien distinctes l'une de l'autre et de celles qui précèdent. Ces quelques mots suffisent pour faire comprendre la division que j'ai été tout naturellement conduit à adopter.

Une première partie qui sert d'*introduction* est consacrée à une exposition générale des phénomènes fondamentaux et à une description des principaux instruments qui servent, soit à produire, soit à percevoir et à mesurer l'électricité. L'explication théorique et complète de ces appareils ne peut, il est vrai, être donnée que plus tard; mais il est essentiel néanmoins d'en connaître dès l'abord la partie descriptive à cause de l'usage constant qu'on est appelé à en faire.

La seconde partie, intitulée : *Électricité statique*, a pour objet l'exposition des phénomènes généraux, soit des lois que présente l'électricité à l'état de repos ou de tension : attractions et répulsions, distribution, induction, électricités dissimulées, théories sur la nature de l'électricité.

La troisième partie comprend les lois générales de l'électricité en mouvement qui constitue l'*Électro-dynamique* et le *Magnétisme*, qui n'est plus lui-même considéré que comme une forme particulière de l'électricité dynamique. Différents chapitres sont successivement consacrés au magnétisme proprement dit, à l'action mutuelle du magnétisme et de l'électricité dynamique, à l'aimantation par l'électricité, à l'induction électro-dynamique et à l'action du magnétisme et de l'électricité dynamique sur tous les corps. Un chapitre distinct est affecté aux galvanomètres magnétiques, à cause de l'importance qu'il y a de bien connaître et de

savoir bien manier ces instruments dont on fait maintenant un emploi si fréquent dans les sciences physiques.

La quatrième partie renferme, sous le titre de *Transmission de l'électricité à travers les différents milieux*, d'abord la description des phénomènes relatifs au mode même de propagation de l'électricité dans l'intérieur des corps, conductibilité, etc.; puis une étude détaillée des effets calorifiques, lumineux et chimiques qui accompagnent cette propagation, et enfin l'examen des phénomènes physiologiques auxquels elle donne naissance dans les corps organisés.

La cinquième partie traite des *Sources de l'électricité*, sujet qui ne peut être convenablement abordé qu'après l'étude des lois générales qui régissent l'électricité, soit statique, soit dynamique, et des phénomènes divers par lesquels elle manifeste son passage à travers les corps. L'examen successif des différentes actions physiques, mécaniques et chimiques qui dégagent l'électricité, est précédé d'un coup d'œil jeté sur les causes en général qui produisent ce dégagement, et est suivi de l'explication théorique des appareils électro-moteurs. Les sources naturelles sont étudiées à leur tour, soit dans leur origine, soit dans leurs effets; l'électricité animale, l'électricité atmosphérique, l'électricité terrestre qui comprend le magnétisme terrestre, sont les trois formes sous lesquelles la nature produit d'elle-même l'électricité; elles forment par conséquent trois chapitres distincts de cette partie du Traité. Chaque source est considérée non-seulement au point de vue du développement de l'électricité à laquelle elle donne naissance, mais aussi dans les rapports qui l'unissent avec les effets analogues à la cause productrice que l'électricité elle-même est capable de produire; rapprochement qui conduit à des considérations générales pleines d'intérêt, sur les forces de la nature. Ainsi, la chaleur, l'action chimique, l'action phy-

siologique, sont à la fois cause et effet de l'électricité, et cette double forme sous laquelle l'électricité manifeste sa relation avec ces trois grandes forces, est une preuve de l'union intime qui les lie, soit avec l'électricité elle-même, soit aussi entre elles.

Enfin la sixième et dernière partie est consacrée *à toutes les diverses applications dont l'électricité est susceptible* : applications électro-chimiques (dorure, galvanoplastie, etc.), applications électro-magnétiques (télégraphie, horloges, etc.), applications électro-calorifiques et électro-lumineuses, applications électro-physiologiques à la médecine.

La simple énumération que je viens de faire des différents points qui sont traités dans mon ouvrage est suffisante, quelque sèche et abrégée qu'elle soit, pour faire saisir à tout esprit un peu philosophique l'étendue considérable qu'occupe l'électricité dans le domaine des sciences physiques. On pourra donc s'étonner de ne pas trouver de place assignée dans ma division à la tractation des grandes questions qui touchent à la constitution de la matière et à la nature des forces physiques, d'autant mieux que l'électricité semble être la forme la plus générale sous laquelle se présente la liaison qui existe entre les corps pondérables et les forces immatérielles. Mais ces considérations plus métaphysiques que physiques ne pourraient être traitées avec le développement qu'elles méritent dans un ouvrage du genre de celui-ci. Toutefois, si je ne les ai pas abordées d'une manière explicite, je n'ai pas craint de m'en occuper indirectement toutes les fois que l'occasion s'en est présentée, convaincu qu'indépendamment de l'intérêt qu'elles offrent par elles-mêmes, elles ont l'immense avantage d'élever l'âme en la rapprochant de l'Auteur suprême de la nature dont l'action directe est au fond toujours le dernier mot de la création.

Genève, novembre 1852.

Addition à la préface de l'édition anglaise.

Le premier volume du *Traité d'Électricité théorique et appliquée*, qui est publié aujourd'hui en français, a paru en anglais, il y a un an. Les circonstances particulières dans lesquelles l'auteur s'était trouvé, l'ayant obligé de suspendre son travail pendant un temps assez long, il en était résulté une interruption dans l'impression de son ouvrage. Aussi l'éditeur anglais, d'accord avec l'auteur, s'était-il décidé à ne pas retarder la publication du premier volume jusqu'à l'époque où le second aurait été prêt. C'est ce premier volume qui paraît également aujourd'hui en français enrichi des travaux qui ont été faits dans l'Électricité pendant l'année qui vient de s'écouler, ainsi que de quelques figures nouvelles qui ont été ajoutées à celles de l'édition anglaise.

Le second volume, qui sera le dernier, est maintenant à l'impression; il paraîtra en français à Paris et en anglais à Londres, dans le courant de l'année 1854.

Genève, 15 janvier 1854.

ERRATA.

Page 35, ligne 23, à couronne de fosses, *lisez :* à couronne de tasses.
— 46, — 18, de deux cents couples, — de deux mille couples.
— 49, — 1, à la droite de la pile, — à la droite de la personne.
— 51, — 31, Delas, — Deluc.
— 67, — 26, sphères isolées, — sphères isolées égales.
— 77, — 3, 350°, — 330°.
— 92, — 9, Bailli, — Belli.
— 94, — 24, l'un des disques A et l'autre B, — le disque A B, A et le disque A' B', B'.
— 132, — 32, 290°, 1110, — 290° et 11 4°.
— 150, — 23 et 24, particules impondérables, — particules pondérables.
— 170, — 3, pour, — par.
— 178, — 2, 223 3/4, — 22 3/4.
— 214, — 13, se partageât, — le partageât.
— 232, — 36, il attire, — il repousse.
— *Id.* — 37, et repousse, — et attire.
— 240, — 33. Le renvoi [1] s'applique à la note de la page 242.
Page 249, lignes 11 et 12, est au-dessous, *lisez :* est au-dessus ou au-dessous.
— 296, — 3, tranches, — branches.
— 267, — 17, § 3. — § 4.
— 303, — 25, d'electricité, — d'élasticité.
— 323, — 33, coton, — cocon.
— 325, — 8, 16 millimètres, — 40 millimètres.
— — — 8, de 10 millimètres, — de 40 millimètres.
— 331, — 10, par loquelle, — pour laquelle.
— 430, — 24, l'introduction, — l'induction.
— *Id.* — 27, par l'induction, — par l'introduction.
— 496, — 26 et 27, aucune espèce d'action, — aucune action sensible.
— *Id.* — 28, n'étant qu'apparent et provenant, — ne semblant provenir.
— 511, — 8, soit oxyde de zinc. — soit oxyde d'étain.

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

PREMIÈRE PARTIE
NOTIONS PRÉLIMINAIRES

CHAPITRE PREMIER.
MANIFESTATION ET FORME DE L'ÉLECTRICITÉ.

§ 1. Électricité développée par le frottement.

Lorsqu'on frotte avec du drap bien sec un bâton de cire, un morceau d'ambre ou une tige de verre, on remarque que ces divers corps acquièrent par l'effet du frottement la propriété d'attirer de petits fragments de papier, de petites boules de moelle de sureau, et en général les substances légères qui sont placées dans leur voisinage. Cette attraction a lieu à distance; et les substances sur lesquelles elle s'exerce restent adhérentes à la surface du corps frotté qui les attire, ou bien sont alternativement repoussées et attirées par ce corps (fig. 1). On dit que les corps chez lesquels le frottement a développé la propriété

Fig. 1.

que nous venons de constater, ont été *électrisés*, et on nomme *électricité* la propriété elle-même et l'agent auquel on suppose qu'elle est due. Ce mot d'*électricité* vient du nom grec ἤλεκτρον qui signifie *ambre*, substance qui fut la première, dit-on, sur laquelle on observa les propriétés électriques.

Les substances qui peuvent être électrisées par le frottement sont nombreuses : ce sont, outre celles que nous avons nommées, le soufre, les différentes espèces de résine, la gomme la-

que, la plupart des cristaux, la cire, la peau de chat, etc. Cependant il en est, et les métaux sont du nombre, chez lesquels il est impossible de développer la même propriété. On avait pour cette raison nommé les premières *idio-électriques* et les secondes *anélectriques*. Mais on reconnut bientôt que cette distinction n'était pas fondée, et que la différence qu'on avait observée entre les corps, sous le rapport de leur susceptibilité à être ou à n'être pas électrisés par le frottement, n'était qu'apparente. Une autre propriété, la *conductibilité électrique*, est la véritable cause de cette différence.

§ 2. Conductibilité électrique.

On fixe à l'une des extrémités d'un bâton de verre ou de cire une tige en métal qui y est ajustée avec soin, puis l'on frotte le bâton de verre ou de cire surtout dans la portion la plus voisine du métal, qu'on a soin de ne pas toucher ni avec la main, ni avec le frottoir. On approche ensuite de petits corps légers; aussitôt ils sont attirés par la tige métallique comme ils le seraient par le verre ou par la cire elle-même; et cette attraction est exercée par tous les points de la tige, quelle que soit sa longueur. Il faut conclure de cette expérience que l'agent qui a été développé sur le verre ou sur la cire par le frottement a passé dans le métal et s'y est répandu, puisque ce dernier se trouve électrisé sans qu'il ait été frotté, uniquement parce qu'il est en contact avec un corps qui est lui-même électrisé. Si à la place de la tige de métal on avait mis une tige de verre, un morceau de cire, en un mot une des substances idio-électriques, elle n'aurait point acquis d'électricité par son simple contact avec le corps électrisé. On nomme *conductibilité pour l'électricité* ou *conductibilité électrique*, cette propriété que possèdent les métaux, et en général les corps qui avaient été désignés sous le nom d'*anélectriques*, de prendre et de propager dans toute leur étendue l'électricité que possède la partie d'un corps électrisé avec laquelle on les met en contact. On nomme *conducteurs* les corps qui possèdent cette propriété, et *isolants*, ceux qui ne la possèdent pas.

Le corps humain, le bois, surtout le bois humide, et en général les animaux, les végétaux et un grand nombre de substances minérales, sont, comme les métaux, des conducteurs de l'électricité. Le globe terrestre l'est également; par contre, l'air atmosphérique, surtout lorsqu'il est bien sec, ne l'est pas.

Plusieurs conséquences importantes découlent de la propriété que nous avons désignée sous le nom de conductibilité électrique :

1° Une surface électrisée qui est mise en communication avec le sol, au moyen d'un ou plusieurs conducteurs, doit perdre son électricité; en effet, cette électricité passe dans les corps conducteurs et de là dans le globe terrestre où elle se répand, et par conséquent devient insensible, vu l'immensité de la masse dans laquelle elle se distribue. Aussi nomme-t-on le globe terrestre le *réservoir commun*, pour indiquer que c'est là que se porte l'électricité des corps qu'on fait communiquer avec lui.

2° L'air atmosphérique étant un corps isolant, les corps électrisés ne perdent point leur électricité par leur contact avec lui. Si l'air était conducteur, aucun corps ne pourrait garder son électricité, car elle se dissiperait immédiatement dans toute la masse de l'atmosphère. C'est ce qui a lieu quand l'air est humide ; il perd alors sa propriété isolante, et l'électricité du corps qui est en contact avec lui se dissipe plus ou moins vite suivant le degré plus ou moins grand d'humidité. Il est donc nécessaire, quand on veut que les expériences qu'on fait avec l'électricité développée par le frottement réussissent bien, de dessécher l'air avec soin lorsqu'il n'est pas naturellement sec.

3° Quand on frotte une substance conductrice qu'on tient à la main, une tige de métal par exemple, on ne doit pas conclure de l'absence de tout signe électrique, que cette substance n'est pas capable d'acquérir de l'électricité par frottement. En effet, en supposant qu'elle pût en acquérir, elle la laisserait échapper immédiatement dans le sol, par l'intermédiaire de la main et du corps de celui qui opère. Au contraire, lorsqu'on tient à la main un corps isolant et qu'on le frotte, il garde son

électricité, parce qu'il ne peut la conduire, et pour la lui faire perdre, il faut toucher successivement avec la main ou avec un conducteur qui communique avec le sol toutes les parties de la substance isolante qui ont été électrisées. Aussi, pour montrer qu'un corps conducteur peut être électrisé, on n'a qu'à l'isoler; c'est-à-dire qu'au lieu de le tenir immédiatement avec la main, il faut le fixer à un manche de verre, de cire ou d'une substance isolante quelconque, au moyen duquel on le tient. On frotte alors ce corps, et il devient capable d'attirer les corps légers comme toute autre substance électrique. Pour bien faire l'expérience, on n'a qu'à se procurer deux boules ou deux cylindres de métal parfaitement semblables, fixés l'un à l'extrémité d'un manche de verre, l'autre à l'extrémité d'un manche de métal; les frotter successivement avec du drap en tenant les manches à la main; le premier attire les corps légers, le second ne les attire jamais. Il faut avoir bien soin seulement de ne pas frotter le manche de verre en même temps qu'on frotte le métal que ce manche est destiné à isoler.

La conductibilité des corps pour l'électricité n'est pas du reste une propriété absolue, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les classer en corps, dont les uns conduisent parfaitement bien l'électricité dans toutes les circonstances, et dont les autres ne la conduisent jamais en aucun cas; en d'autres termes, en *conducteurs parfaits et en isolants parfaits.*

Les métaux sont des conducteurs presque parfaits; cependant ils présentent entre eux des différences relativement à leur degré de conductibilité, et le même métal conduit plus ou moins bien, suivant ses dimensions et sa température. Les substances résineuses, les substances vitrées, la soie, les huiles, le caoutchouc, la gutta-percha, sont des substances qui isolent très-bien, mais non toutes au même degré; ainsi un fil de gomme laque très-fin isole mieux qu'un fil de soie ou de verre du même diamètre. La gomme laque et les résines isolent d'autant mieux qu'elles sont tirées en fils plus fins; c'est l'inverse pour le verre, qui, tiré en fils fins, devient passablement bon conducteur. Enfin, le bois, l'eau pure, le corps humain, un grand nombre de minéraux, conduisent imparfaitement,

c'est-à-dire qu'ils conduisent bien une forte électricité, et moins bien, et quelquefois point du tout, une faible.

La propriété conductrice des corps paraît dépendre essentiellement de leur nature chimique; ainsi, nous voyons les métaux être tous de bons conducteurs, et la plupart des substances hydrogénées être de mauvais conducteurs. Toutefois, la constitution physique influe aussi, dans bien des cas, sur la conductibilité; la glace ne conduit pas, tandis que l'eau conduit; le suif et la cire ne deviennent conducteurs que lorsqu'ils sont fondus; il en est de même de plusieurs sels; le verre est bon conducteur quand il est chauffé au rouge. M. Matteucci a en outre remarqué dernièrement que le soufre et la gomme laque perdent une partie de leur pouvoir isolant par une élévation de température incapable de changer leur cohésion. Le diamant est un isolant parfait, tandis que le charbon minéral est un bon conducteur s'il a été fortement chauffé; le charbon, en général, conduit plus ou moins bien, suivant la manière dont il a été préparé et suivant qu'il a été plus ou moins recuit. L'air et les gaz sont d'autant moins isolants qu'ils sont plus raréfiés; c'est ce qui fait dire que le vide est un bon conducteur de l'électricité. Nous aurons occasion d'examiner plus tard la question importante de la conductibilité du vide.

Enfin, il est une circonstance indépendante de la nature chimique et de la constitution physique des corps qui les rend plus ou moins bons conducteurs; c'est leur degré d'affinité pour l'humidité de l'air. Nous avons déjà vu que l'air et les gaz humides cessent d'être isolants. Le verre, qui est par lui-même un bon isolant, devient facilement conducteur dès qu'il est exposé à l'humidité; il attire sur sa surface les vapeurs aqueuses de l'atmosphère qui y forment une mince couche d'eau par laquelle l'électricité s'écoule. Aussi, pour que les tiges de verre isolent bien l'électricité accumulée sur des conducteurs auxquels elles servent de support, on a soin de les recouvrir d'une couche mince d'un vernis fait avec de la gomme laque dissoute dans l'alcool, couche qui protége la surface du verre contre le dépôt de l'humidité, et qui en même temps isole elle-même très-bien. C'est probablement à la propriété hygrométrique du verre qu'il

faut attribuer la faculté conductrice qu'il acquiert en étant tiré en fils minces, parce qu'il présente plus de surface à l'air humide.

Il est difficile de déterminer les différences de conductibilité entre les corps lorsque ces différences sont légères ; il faut pour cela des moyens délicats dont nous parlerons plus tard. Mais lorsqu'il s'agit de savoir si un corps doit être en général rangé dans la classe des corps isolants ou dans celle des corps conducteurs, le moyen est facile. Prenons pour exemple un fil de soie et un fil de métal ; on les choisit de même longueur et du même diamètre ; on fixe à l'une des extrémités de chacun d'eux une boule conductrice, de métal, par exemple, puis on les suspend verticalement, par leur autre extrémité, aux deux bouts d'une tige de métal horizontale, et supportée elle-même par une tige isolante de verre (fig. 2). On promène sur la tige de métal les différentes parties de la surface d'un morceau de verre ou de cire électrisés ; l'électricité passe ainsi dans le métal et se répand de là dans toutes les substances conductrices en contact avec lui ; elle pénètre dans le fil fin de métal et dans la boule qui y est suspendue et non dans le fil de soie, ni par conséquent dans la boule qui le termine, ce dont on s'assure en voyant que la première des deux boules attire les corps légers et non la seconde. On peut opérer de la même manière sur toutes les substances en les tirant en tiges de même diamètre et de même longueur ; chaque tige doit porter à l'une de ses extrémités une boule, tandis que l'autre extrémité est fixée au support métallique isolé qui reçoit l'électricité.

Fig. 2.

Voici un tableau approximatif de la faculté conductrice et isolante des différents corps ; ce tableau se compose de deux parties : la première renferme les corps conducteurs placés dans l'ordre de leur degré de conductibilité, en commençant par les plus conducteurs, et la seconde renferme les corps isolants placés dans l'ordre de leur faculté isolante, en commençant par les moins isolants ; il en résulte que la seconde partie peut être envisagée comme une continuation de la première.

1° Corps conducteurs placés dans l'ordre de leur pouvoir conducteur.

Tous les métaux.
Le charbon bien brûlé.
La plombagine.
Les acides concentrés.
Les acides étendus.
Les solutions salines.
Les minerais métalliques.
Les fluides animaux.
L'eau de mer.
L'eau de source.
L'eau de pluie.
La glace au-dessus de 13° Fahr.
La neige.
Les végétaux vivants.
Les animaux vivants.
La flamme.
La fumée.
La vapeur.
Les sels solubles dans l'eau.
L'air raréfié.
La vapeur d'alcool.
La vapeur d'éther.
Les terres et les pierres humides.
Le verre pulvérisé.
La fleur de soufre.

2° Corps isolants placés dans l'ordre inverse de leur faculté isolante.

Les oxydes secs métalliques.
Les huiles, les plus pesantes sont les meilleures.
Les cendres des corps végétaux.
Les cendres des corps animaux.
Plusieurs cristaux transparents secs.
La glace.
Le phosphore.
La chaux.
La craie sèche.
Le carbonate natif de baryte.
Le lycopodium.
Le caoutchouc.
Le camphre.
Quelques pierres siliceuses et argileuses.
Le marbre sec.
La porcelaine.
Les corps végétaux secs.
Le bois qui a été fortement chauffé.
Les gaz et l'air secs.
Le cuir.
Le parchemin.
Le papier sec.
Les plumes.
Les cheveux, la laine.
La soie teinte.
La soie blanchie.
La soie écrue.
Les pierres précieuses transparentes.
Le diamant.
Le mica.
Toutes les vitrifications.
Le verre.
Le jais.
La cire.
Le soufre.
Les résines.
L'ambre.
La gomme laque [1].

[1] La *gutta-percha* paraît être l'une des substances connues les plus isolantes; cependant sa place ne peut pas être assignée exactement dans ce tableau.

§ 3. Électricité par communication.

Les corps sont donc tous capables de devenir électriques par le frottement; mais ils diffèrent entre eux quant à la faculté qu'ils ont de transmettre l'électricité; les uns la transmettent promptement et librement, les autres plus lentement et difficilement, d'autres semblent ne pouvoir presque pas la transmettre. Toutefois ils sont tous susceptibles de prendre de l'électricité à un corps électrisé avec lequel on les touche; seulement, si le corps touché est isolant, il ne prend de l'électricité que dans la partie de sa surface qu'on a touchée, tandis que, s'il est conducteur, il en prend dans toute son étendue, quoiqu'il n'en ait reçu qu'en un point. C'est un moyen d'électriser qu'on nomme *électriser par communication.*

Remarquons encore que le corps électrisé, s'il est isolant, ne donne au corps conducteur qu'il touche que l'électricité qu'il possède aux points dans lesquels le contact a lieu; mais, s'il est conducteur, il s'opère alors un partage de son électricité entre lui et le corps touché, partage qui est soumis à une loi bien simple; savoir que chacun des deux corps, que nous supposons nécessairement isolés, prend une partie de l'électricité totale, proportionnelle à sa propre surface. Cette loi, que nous démontrerons plus tard, explique pourquoi un corps conducteur isolé et électrisé, mis en communication avec le sol, perd toute son électricité; l'électricité qu'il possédait se partage réellement entre lui et la terre proportionnellement à leurs surfaces respectives; mais, sa surface étant infiniment petite par rapport à celle de la terre, il doit donc, après le contact, lui rester infiniment peu ou point d'électricité.

Il arrive souvent que, lorsqu'on approche un corps électrisé d'un corps qui ne l'est pas, l'électricité du premier passe dans le second avant qu'il y ait contact entre eux, sous forme d'une étincelle qui traverse la couche d'air qui les sépare. Cette circonstance ne modifie en rien le résultat définitif, lequel est le même que si la communication s'était faite au contact.

§ 4. Distinction entre les deux électricités.

Nous avons jusqu'ici appelé d'une manière générale *électrisés* tous les corps, quels qu'ils soient, qui, après avoir été frottés ou mis en communication avec un corps électrisé, exercent une attraction à distance sur des corps légers. Nous allons maintenant étudier ce genre d'action de plus près, et nous verrons que cette étude nous conduira à reconnaître que l'électricité que manifestent les différentes substances n'est pas toujours identique.

Suspendons à un fil de soie écrue fixé lui-même à un support de verre, afin que l'isolement soit plus complet, une balle conductrice de moelle de sureau de 5 à 10 millimètres de diamètre [1]; nous aurons un appareil que nous nommerons électroscope simple, ou pendule électrique. Approchons de cette balle un bâton de verre électrisé, la balle sera attirée, touchera le verre, puis, après l'avoir touché, elle en sera aussitôt repoussée (fig. 3). La balle aura acquis de l'électricité par son contact avec le verre; elle gardera cette électricité, puisqu'elle est isolée; mais, si on la touche avec la main, elle la perdra aussitôt et reviendra à l'état naturel. Ayons une seconde balle semblable à la première, suspendue à la même hauteur et électrisée de la même manière; puis rapprochons avec précaution, et en leur donnant le moins de mouvement possible, les deux balles ainsi électrisées: arrivées à une distance plus ou moins grande l'une de l'autre, elles se repousseront, et se repousseront d'autant plus fortement qu'on tentera de les rapprocher davantage. Faisons la même expérience en employant, pour électriser les deux balles, un bâton de cire frotté au lieu d'une tige de verre, nous aurons exactement le même résultat. Mais électrisons l'une des balles avec la tige de verre, l'autre


Fig. 3.

[1] On peut employer aussi des balles de moelle de sureau recouvertes d'une mince feuille d'or, ou des boules métalliques creuses très-légères.

avec le bâton de cire, puis rapprochons-les avec précaution ; arrivées à une certaine distance, nous les verrons s'attirer, puis se précipiter l'une sur l'autre, et, après s'être touchées, reprendre la position verticale et ne plus donner aucun signe d'électricité (fig. 4)[1].

Fig. 4.

Si l'une des balles est électrisée, soit avec le verre, soit avec la cire, et que l'autre ne le soit pas, elles s'attirent l'une l'autre, et, dès qu'elles ont été en contact, elles se repoussent, la première ayant donné, par communication, une partie de sa propre électricité à la seconde.

Nous pouvons conclure des expériences qui précèdent :

1° Qu'il y a attraction entre un corps électrisé et un corps qui ne l'est pas ;

2° Qu'il y a répulsion entre deux corps électrisés par la même source d'électricité ;

3° Qu'il y a attraction entre deux corps électrisés l'un par le verre, l'autre par la cire.

Il n'y a donc pas identité entre l'électricité qu'acquiert le verre par le frottement, et celle qu'acquiert la cire, puisque, sur un corps électrisé de la même manière, l'effet de l'une est répulsif, et l'effet de l'autre attractif. Aussi, pour les distinguer, a-t-on nommé la première *électricité vitrée*, et la seconde *électricité résineuse*.

L'expérience a appris que tous les corps de la nature acquièrent, en étant frottés, l'une ou l'autre de ces deux électricités. Le verre et les corps vitrés, en général, acquièrent la première ; la cire, la gomme laque, les résines, la seconde. Les métaux acquièrent également l'électricité résineuse. Toutefois l'espèce d'électricité qui est développée sur un corps ne dépend pas seu-

[1] Lorsque les balles sont de sureau, il arrive quelquefois que le contact dure quelques moments avant que la neutralisation soit complète. Cela vient de ce que la moelle de sureau lorsqu'elle est sèche n'est pas un conducteur parfait et que l'électricité, par conséquent, n'y circule pas librement et promptement. Avec des boules de métal ou des balles de sureau recouvertes d'une feuille de métal, le même inconvénient ne se présente pas.

lement de la nature de ce corps, mais aussi de celle de la substance avec laquelle on le frotte. Pour comprendre cette influence, il faut savoir que jamais l'une des électricités n'est développée sans que l'autre ne le soit également, et que, lorsque deux substances sont frottées l'une contre l'autre, si la substance frottée prend l'électricité vitrée, la substance frottante prend l'électricité résineuse, et réciproquement. Voici comment on peut s'en assurer :

Au lieu de tenir à la main le morceau de drap dont on se sert pour opérer le frottement, on l'enroule à l'extrémité d'une tige de verre, au moyen de laquelle on le tient, puis on frotte une autre tige de verre avec le drap ainsi isolé. Après le frottement, on approche le verre électrisé de la boule de moelle de sureau d'un électroscope simple, cette boule est attirée, puis repoussée après avoir pris l'électricité vitrée. On en approche alors le morceau de drap isolé qui a servi de frottoir, elle est immédiatement attirée, preuve que le drap a pris, dans le frottement, l'électricité résineuse. Si l'on frotte avec le drap isolé un morceau de cire ou de gomme laque, on trouve que le drap prend l'électricité vitrée; la cire ou la gomme laque se charge, par contre, d'électricité résineuse. Dans ce cas, il faut prendre garde que la substance résineuse, en étant frottée, ne laisse pas un dépôt sur le drap, ce qui rendrait douteux le résultat de l'expérience.

L'électricité que prend une certaine substance n'est pas toujours la même; il n'y a rien d'absolu à cet égard. Ainsi, le drap prend l'électricité résineuse quand il est frotté avec du verre, et de la vitrée quand il est frotté avec de la cire. Le verre lui-même peut prendre l'électricité résineuse, s'il est frotté avec une peau de chat, tandis qu'il prend la vitrée, s'il est frotté avec du drap.

On a dressé des tableaux dans lesquels les substances sont placées dans un ordre tel, que chacune prend l'électricité vitrée si elle est frottée par celles qui la suivent dans le tableau, et l'électricité résineuse si elle est frottée par celles qui la précèdent.

En voici un qui est adopté généralement :

La peau du chat.
Le verre poli.
Le drap de laine.
Les plumes.
Le bois.
Le papier.
La soie.
La gomme laque.
Le verre dépoli.

Cependant ces tableaux ne sont jamais parfaitement exacts. Nous reviendrons sur ce sujet quand nous étudierons le frottement comme source d'électricité. Bornons-nous à ajouter que, indépendamment de la nature chimique, certaines circonstances physiques peuvent influer sur la nature de l'électricité que prennent les corps dans leur frottement mutuel. Ainsi, le poli, la température exercent à cet égard une influence remarquable. Le poli augmente la tendance d'un corps à prendre de l'électricité vitrée, l'élévation de la température, sa tendance à prendre l'électricité résineuse. Deux morceaux du même verre, l'un poli, l'autre dépoli, frottés ensemble, prennent, le premier l'électricité vitrée, le second la résineuse. L'élévation de la température, non-seulement augmente la tendance résineuse, mais facilite beaucoup en général le développement de l'électricité chez les corps.

§ 5. Neutralisation des deux électricités.

Nous avons vu que, lorsque deux boules de sureau mobiles et isolées ont des électricités différentes, elles s'attirent, viennent en contact, puis qu'après le contact elles reprennent leur état naturel. Les deux électricités ont disparu, elles se sont *neutralisées*. Pour que cette neutralisation soit complète, il faut que les deux boules aient autant d'électricité l'une que l'autre, condition assez facile à remplir, comme nous le verrons plus loin. Si l'électricité de l'une est plus forte que l'électricité de l'autre, il reste alors après le contact un excès d'électricité, vitrée ou résineuse, suivant que la vitrée ou la résineuse était en plus grande proportion. Ainsi, pour neutraliser une certaine quantité d'électricité *vitrée*, il faut toujours une quantité égale d'électricité *résineuse*, et réciproquement. Aussi appelle-t-on souvent une des électricités, la vitrée, *positive*, et l'autre, la

résineuse, *négative*, en se fondant sur ce principe que de même qu'en ajoutant $+e$ à $-e$ on a 0, de même en donnant à un corps qui a une certaine quantité d'électricité résineuse une quantité égale de vitrée, on a pour résultat zéro d'électricité ; résultat qu'on ne peut traduire mathématiquement qu'en donnant le signe + à la quantité qui représente l'une des électricités, et le signe — à la quantité égale qui représente l'autre. Cette dénomination est complétement indépendante des idées qu'on peut se former sur la nature de l'électricité, car elle repose, non sur une simple hypothèse, mais sur une loi expérimentale.

La neutralisation des deux électricités contraires, conséquence de leur attraction, peut avoir lieu suivant différents modes. Elle peut s'opérer à distance dans le cas où ni l'une ni l'autre des deux boules n'est assez mobile pour obéir à l'attraction qui règne entre elles. Deux boules de métal sont placées chacune à l'extrémité d'une tige verticale de verre; l'une est électrisée vitreusement, soit positivement, l'autre résineusement, soit négativement. On rapproche l'un de l'autre les deux supports isolants et par conséquent les deux boules; étant retenues par leurs supports, elles ne peuvent se porter l'une vers l'autre ; mais à une distance plus ou moins grande, suivant la charge électrique qu'elles possèdent, on voit briller entre elles une étincelle instantanée, accompagnée d'un léger pétillement, et, immédiatement après, on peut constater qu'elles ont perdu leur électricité et qu'elles sont à l'état naturel. On n'a, pour s'en assurer, qu'à approcher d'elles la balle d'un pendule électrique; elle n'est plus attirée, tandis qu'elle l'était avant que l'étincelle fût partie. L'étincelle a donc été la manifestation de la neutralisation des deux électricités contraires qui, en quittant les corps où elles se trouvaient séparément accumulées, se sont portées l'une vers l'autre à travers l'air en vertu de leur attraction mutuelle, attraction à laquelle les corps électrisés eux-mêmes ne pouvaient obéir. Ce mode de neutralisation ne peut avoir lieu qu'autant que les deux corps électrisés sont placés à une distance l'un de l'autre, peu considérable, distance qui doit varier avec l'intensité de l'électricité dont ils sont chargés et l'état de l'air compris entre eux. Mais, quelle que soit cette distance,

on peut neutraliser les électricités contraires en faisant communiquer les deux boules au moyen d'un conducteur isolé, tel qu'un fil de métal tenu par un manche isolant.

Quand la neutralisatiou s'opère, soit à travers l'air avec étincelle, soit à travers un conducteur, l'électricité est dite être à l'*état dynamique* pendant l'instant que dure cette neutralisation. Seulement, dans le cas qui vient de nous occuper, cet état dynamique est *instantané;* on l'appelle aussi *décharge électrique.* Cette dénomination de *dynamique* est donnée à l'état de mouvement dans lequel on suppose que se trouvent les deux électricités quand elles se portent l'une vers l'autre pour se neutraliser, par opposition à l'état *statique* ou de repos, dans lequel ces deux électricités se trouvent quand elles sont accumulées séparément sur des corps isolés. Ce dernier état se nomme également *tension électrique.*

L'état dynamique peut être *instantané* ou *continu.* Il est *instantané* dans le cas précédent, où les deux boules métalliques électrisées sont isolées, et par conséquent n'acquièrent plus d'électricité une fois que celles qu'elles possédaient se sont mutuellement neutralisées. Mais supposons l'une des deux boules en communication avec une source constante d'életricité négative, l'autre avec une source également constante d'éclectrieité positive, les deux électricités se renouvelant constamment à mesure qu'elles se neutralisent, il y aura entre les deux boules une succession continuelle d'étincelles; et si elles communiquent par un conducteur, il y aura à travers ce conducteur une neutralisation non interrompue, soit une réunion continue des deux électricités; c'est ce qu'on nomme l'*état dynamique continu* ou *courant électrique.* L'on dit alors que le corps conducteur qui sert à établir une communication entre les deux boules est traversé par un courant électrique.

Les corps qui servent de passage à l'électricité quand elle est à l'état dynamique, soit instantané, soit continu, éprouvent par l'effet de ce passage des modifications, les unes temporaires, les autres permanentes qui sont extrêmement remarquables. Nous n'en citerons pour le moment que deux exemples. Si c'est un fil métallique très-fin et d'une longueur peu considérable

qui serve à transmettre l'électricité dynamique, ce fil s'échauffe, devient incandescent et peut même fondre lorsque les électricités dont il opère la réunion ont une grande intensité. Si le corps à travers lequel la transmission a lieu est de l'eau, cette eau est en partie décomposée, et on voit se dégager ses deux gaz constituants, savoir, l'oxygène et l'hydrogène. Mais cet effet se manifeste surtout quand l'état dynamique est continu, c'est-à-dire quand l'électricité est à l'état de courant; tandis que le premier effet que nous avons mentionné, celui du réchauffement, a lieu également, bien que l'état dynamique soit instantané ou qu'il soit continu.

§ 6. Théories sur la nature de l'électricité.

Nous aurions maintenant à étudier les propriétés que possède l'électricité, soit quand on la considère à l'état statique, soit quand on l'envisage à l'état dynamique. Mais, avant de passer à cette étude, il importe de nous faire une idée de ce que c'est que l'électricité et des opinions qu'on s'est formées à ce sujet; la connaissance de ces théories nous est absolument nécessaire, quand ce ne serait que pour nous familiariser avec les expressions consacrées qui en dépendent en grande partie.

La théorie la plus généralement admise dans l'état actuel de nos connaissances, consiste à regarder chacune des électricités, aussi bien la vitrée que la résineuse, comme des fluides excessivement subtils et impondérables composés chacun de particules qui se repoussent mutuellement, tandis que les particules de l'un attirent les particules de l'autre. Ces fluides peuvent cheminer librement dans les corps conducteurs, et comme leurs particules tendent à se repousser mutuellement, elles se portent à la surface de ces corps où elles restent, parce qu'elles rencontrent l'air qui, étant un corps isolant, ne leur permet pas d'aller plus loin. Dans les corps non conducteurs les deux fluides sont gênés dans leurs mouvements, ce qu'on attribue à ce qu'ils sont retenus par les particules de ces corps. Quand les deux fluides se réunissent en vertu de leur attraction mutuelle, ils se neutralisent et forment *le fluide neutre* ou *l'électricité naturelle*, dont l'action n'est pas sensible,

parce que l'effet des deux fluides contraires se contre-balance. On admet que tout corps renferme de l'électricité naturelle; d'après cela, électriser un corps c'est décomposer cette électricité, dont une des parties ou l'un des *principes* reste en excès sur le corps frotté, et l'autre principe reste en excès sur le corps frottant. Cette théorie est celle des deux fluides dite de Symmer.

La théorie de Franklin consiste à n'admettre qu'un seul fluide électrique impondérable, très-subtil et dont toutes les particules se repoussent mutuellement. Chaque corps a une capacité déterminée pour ce fluide; lorsqu'il en renferme ce qu'il doit en avoir naturellement, le corps est à l'état électrique naturel. Électriser un corps vitreusement, c'est lui donner plus d'électricité qu'il n'en renferme naturellement, il est alors à l'état électrique *positif;* électriser résineusement un corps, c'est lui ôter une partie de son électricité naturelle, il est alors à l'état électrique *négatif*. Nous avons vu que ces dénominations d'électricité positive et négative qui découlent de la théorie de Franklin peuvent se justifier par des considérations tout à fait indépendantes de toute vue hypothétique.

Nous ne discuterons pas ici le mérite comparatif de ces deux théories; la seconde, telle que Franklin du moins l'a formulée, ne peut être admise; nous verrons plus loin pourquoi. La première, quoique sujette à de fortes objections, est cependant, dans l'état actuel de la science, une manière assez commode de se représenter cet agent que nous nommons *électricité;* c'est sous ce point de vue que nous l'adopterons. Il est, du reste, bien probable que l'électricité, au lieu de consister en un ou deux fluides spéciaux, n'est que le résultat d'une modification particulière dans l'état des corps; modification qui dépend probablement de l'action mutuelle qu'exercent les unes sur les autres les particules pondérables de la matière et le fluide subtil qui les entoure de toutes parts, qu'on désigne sous le nom d'*éther*, et dont les ondulations constituent la lumière et la chaleur.

CHAPITRE II.

DES INSTRUMENTS ÉLECTRIQUES LES PLUS USUELS.

De même que pour faire l'étude détaillée de l'électricité, il nous a été nécessaire de nous familiariser d'avance avec quelques notions théoriques, de même aussi il nous importe de bien connaître dès l'abord quelques-uns des instruments dont nous serons appelés à faire usage le plus souvent, en particulier, la *machine électrique* et les *électroscopes*, la *pile voltaïque* et les *voltamètres*.

§ 1. Machine électrique.

Une machine électrique (fig. 5) se compose d'un plateau circulaire en verre de 2 à 5 millimètres d'épaisseur, et dont le diamètre varie également de grandeur; il est ordinairement de 60 à 80 centimètres, quelquefois d'un mètre; il existe même à Londres, à l'Institution Polytechnique, une machine électrique dont le plateau a 2 mètres de diamètre. Le plateau est traversé à son centre par un axe métallique qui est fixé solidement au verre au moyen de deux viroles; cet axe repose sur deux supports en bois fixés verticalement à l'extrémité d'une table solide, et il est placé de telle façon, que le plateau de verre se trouve entre les deux supports et à égale distance de l'un et de l'autre. Une manivelle fixée à celle des deux extrémités de l'axe qui se trouve située du côté extérieur de

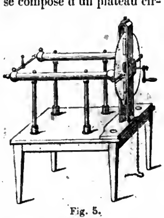


Fig. 5.

la table sert à imprimer au plateau un mouvement de rotation. Cette manivelle est le plus souvent en grande partie en verre, afin que l'électricité de la portion du plateau la plus rapprochée de l'axe ne puisse être conduite dans le sol par la main et le corps de celui qui fait marcher la machine, ce qui aurait lieu sans cette précaution. Deux paires de coussinets en crin recouverts de cuir sont placées, l'une dans la partie supérieure, l'autre dans la partie inférieure de chacun des deux supports verticaux. Ces coussins sont disposés de manière que chaque portion du plateau vienne, par l'effet du mouvement de rotation, passer successivement entre eux, d'abord en haut, ensuite en bas; il faut de plus que les coussins soient assez rapprochés et assez élastiques pour exercer un frottement qui électrise le verre. Les coussins ont de douze à quinze centimètres de largeur, et ils sont aussi longs que possible, tout en laissant cependant un intervalle suffisant entre leurs extrémités et les rondelles métalliques qui assujettissent l'axe du plateau.

L'expérience a appris que, pour rendre le dégagement de l'électricité plus considérable, il faut recouvrir la surface de cuir du coussin d'un amalgame de zinc ou d'une couche d'or musif (*deuto-sulfure d'étain*); sans l'addition de cette couche, qu'il faut renouveler souvent, l'électricité développée par le frottement immédiat du verre contre le cuir serait excessivement faible. Enfin l'électricité vitrée, que le plateau de verre acquiert par l'effet du frottement, est recueillie par des conducteurs cylindriques, ordinairement en laiton, qui sont portés horizontalement sur des tiges de verre verticales fixées elles-mêmes sur la table, à l'une des extrémités de laquelle se trouvent placés les supports qui portent le plateau de verre et les coussins. Ordinairement il y a deux conducteurs parallèles, portés chacun par deux pieds en verre et réunis par une tige métallique qui va de l'un à l'autre; ces deux conducteurs sont situés derrière le plateau, parallèlement au prolongement de son axe et à la même hauteur que cet axe dont ils sont à égale distance. Quelquefois il n'y a qu'un conducteur, et il est situé aussi derrière le plateau sur le prolongement de l'axe, et se bifurque près du plateau en deux branches qui sont également distantes de

son centre. Chacune de ces branches ou chacun des deux conducteurs, quand il y en a deux, porte à son extrémité la plus rapprochée du plateau un bras métallique qui est replié de façon à envelopper, sans la toucher, la partie de la surface du plateau qui se trouve à la hauteur de l'axe. Ces appendices sont, dans la partie de leur surface tournée du côté du verre, garnis de pointes métalliques qui arrivent aussi près que possible du plateau, sans cependant être en contact avec lui. Ces pointes servent à soutirer à toutes les parties du plateau, qui se présentent successivement devant elles, l'électricité qu'elles ont acquise par leur passage entre les coussins. Une enveloppe de taffetas ciré sert à protéger contre la poussière et contre l'agitation de l'air la partie du plateau qui vient de s'électriser contre les coussins, jusqu'à son arrivée devant les pointes qui lui soutirent son électricité. Celle-ci passe ensuite aux conducteurs isolés, où elle s'accumule en proportion plus ou moins grande suivant la force de la machine et le temps plus ou moins long pendant lequel elle a marché. Il y a cependant une limite à ce temps; lorsque l'intensité de l'électricité est sur chaque partie du conducteur égale à ce qu'elle est sur la partie du plateau qui vient d'éprouver le frottement et qui n'est pas encore déchargée, il n'est pas possible d'augmenter la charge électrique de ce conducteur, lors même qu'on continue à faire marcher la machine.

Pour pouvoir conserver l'électricité sur les conducteurs, il faut que ceux-ci ne présentent point de parties anguleuses ou pointues, sauf celles par lesquelles pénètre l'électricité, et qu'ils soient dans toute leur étendue d'une forme aussi arrondie que possible. Il faut de plus que les supports soient bien isolants, et c'est dans ce but que l'on recouvre les tiges de verre d'une couche de vernis à la gomme laque. Lorsque l'air est humide, il faut le dessécher autour des conducteurs au moyen de réchauds remplis de charbons ardents, et il faut frotter les supports isolants avec des linges chauds. Comme il s'attache aussi de l'humidité au plateau de verre lui-même et que cette humidité est très-contraire au développement de l'électricité, il faut, pour l'éviter, frotter celui-ci fréquemment, soit avec un linge chaud,

soit, ce qui vaut encore mieux, avec un chiffon imprégné d'éther. La poussière qui voltige dans une chambre est souvent aussi nuisible que l'humidité à la conservation de l'électricité sur les conducteurs isolés; il faut donc s'en préserver autant que possible et avoir soin, dans ce but, d'essuyer souvent avec des linges bien propres les conducteurs et les supports isolants.

Dans la machine électrique, telle que nous venons de la décrire, les coussins communiquent avec le sol au moyen des supports en bois et de la table également en bois sur laquelle ces supports sont placés; quelquefois on y ajoute une chaîne métallique pour faciliter cette communication; aussi l'électricité négative qu'ils acquièrent par le frottement se perd à mesure qu'elle se dégage; si on veut la recueillir, il faut isoler les coussins au moyen de supports en verre, ce qui exige une construction légèrement différente. En isolant ainsi les coussins, on a bien l'électricité négative, mais la quantité d'électricité positive, recueillie sur les conducteurs isolés, est réduite à moitié; c'est une conséquence des lois du dégagement de l'électricité par le frottement, comme nous le verrons plus loin. Aussi vaut-il mieux, lorsque l'on ne veut avoir que l'électricité positive, faire communiquer les coussins avec le sol, au moyen d'une chaîne métallique. Si on ne veut avoir que de l'électricité négative, il faut, par la même raison, faire communiquer avec le sol, au moyen d'une chaîne métallique, les conducteurs sur lesquels se porte la positive. Si l'on a besoin d'avoir en même temps les deux électricités, il faut alors ne faire communiquer avec le sol ni les conducteurs ni les coussins.

Autrefois on employait de préférence, dans la construction des machines électriques, des manchons, soit cylindres de verre, au lieu de plateaux circulaires; et il y a encore des machines puissantes construites d'après ce mode; il en résulte quelques différences faciles à concevoir dans les détails de construction; nous n'y insisterons pas. La machine (fig. 6), dont les coussins sont isolés, est une machine à manchon.

Une circonstance importante, c'est la qualité du verre dont est fait le plateau ou le cylindre. Il est impossible d'indiquer

aucune règle à cet égard ; l'expérience peut seule prononcer dans chaque cas particulier. En général, les verres les meilleurs

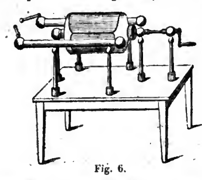


Fig. 6.

sont ceux dans la composition desquels il entre le moins d'alcali et les verres à base de potasse ; aussi le verre un peu ancien, en particulier celui de Bohême, est-il préférable au verre moderne. On affirme que l'exposition au soleil pendant un certain temps, pendant toute une belle journée d'été, par exemple, donne à un plateau de verre une grande puissance électrique.

On a remis dernièrement en usage un système de frottoirs dont l'idée paraît appartenir à Van Marum, physicien qui vivait en 1788. Ces frottoirs, qui donnent aux plateaux de verre une tension électrique bien supérieure à celle qu'on obtient avec des coussins de crin, consistent en une plaque de bois bien plane, recouverte d'un cuir flexible sur lequel on étend une feuille d'étain, et sur celle-ci un morceau de taffetas qui dépasse le frottoir de quelques centimètres. C'est ce taffetas enduit d'or musif ou encore mieux d'un alliage d'étain, de zinc, de bismuth et de mercure, réduit en poussière très-fine, qui frotte contre le verre et l'électrise positivement en s'électrisant lui-même négativement. Il faut avoir soin que les plateaux de bois, ainsi recouverts, soient pressés contre le plateau de verre par deux vis de pression qu'on règle à volonté.

La machine électrique est toujours accompagnée de quelques appareils qu'il faut également connaître à cause de l'usage fréquent que l'on en fait. Ce sont, en particulier, l'*électromètre à cadran*, l'*excitateur* et le *tabouret isolant*.

L'électromètre à cadran (fig. 7) consiste dans une tige métallique qu'on fixe verticalement sur un pied ou sur le conducteur d'une machine électrique; la tige porte dans sa partie supérieure une petite aiguille de bois ou d'ivoire, terminée par une balle de moelle de sureau et mobile dans un plan vertical. Elle prend naturellement une position verticale, par conséquent parrallèle à celle de la tige avec laquelle la balle de moëlle de sureau est en contact. Mais l'électricité qu'on fait arriver à l'instrument oblige la balle de s'écarter de la tige fixe et fait décrire, par conséquent, à l'aiguille qui la porte un angle plus ou moins grand que mesure une division circulaire.

Fig. 7.

L'excitateur (fig. 8) est un conducteur en métal, composé de deux tiges semblables, unies par une charnière qui permet de les écarter plus ou moins l'une de l'autre, et terminées chacune par une boule; un, ou plus souvent deux manches de verre permettent à l'expérimentateur de tenir avec les mains les tiges conductrices, de façon à s'en servir pour faire passer d'un corps à un autre l'électricité qui, sans cela, s'écoulerait dans le sol.

Fig. 8.

Le tabouret isolant (fig. 9) est une table en bois plus ou moins grande, supportée par des pieds en verre; tous les corps qu'on y place se trouvent ainsi isolés. Ordinairement les pieds sont assez forts pour supporter le poids d'un homme. Si celui-ci, placé sur le tabouret isolant, touche avec sa main le conducteur d'une machine électrique en action, on peut soutirer de toutes les parties de son corps des étincelles semblables à celles qu'on tirerait du conducteur lui-même.

Fig. 9.

Parmi les nombreuses expériences qu'on peut faire avec la machine électrique, nous nous bornerons pour le moment à citer les suivantes :

Si on approche la main du conducteur de la machine, il se manifeste, entre les conducteurs et la main, une lueur vive et instantanée qui est accompagnée d'une sensation douloureuse plus ou moins forte. C'est l'étincelle électrique que nous avons déjà vu se produire dans la neutralisation des deux électricités, et qui se montre ici quand une seule des deux électricités, n'importe laquelle, s'échappe d'un conducteur sur lequel elle est accumulée pour passer, à travers l'air, dans un autre conducteur.

Un conducteur quelconque, substitué à la main, produit le même effet.

On peut obliger l'étincelle électrique à traverser des corps peu ou point conducteurs, tels que de l'éther et de l'alcool; elle les enflamme instantanément.

Elle enflamme également les gaz combustibles, tels que l'hydrogène; aussi, si l'on approche une chandelle qu'on vient d'éteindre du conducteur électrisé de la machine, de façon que l'étincelle aille du conducteur à la chandelle, à travers la fumée qui n'est autre chose que du gaz hydrogène carburé, on rallume la chandelle.

Pour enflammer l'hydrogène, on se sert souvent du pistolet de Volta (fig. 10), qui est un petit vase en tôle, dans l'intérieur duquel se trouve l'extrémité arrondie d'une tige métallique isolée au moyen d'un tube de verre et de la cire et dont l'autre extrémité aboutit hors du verre. On met dans le vase un peu de l'hydrogène qui se trouve mélangé avec l'air; puis, au moyen d'un bouchon de liége, on intercepte toute communication avec l'air extérieur. On fait passer l'étincelle électrique dans l'intérieur au moyen de la tige conductrice isolée. Il en résulte une forte détonation provenant de la combinaison de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air, et le bouchon de liége est projeté au loin.

Fig. 10.

L'emploi de la machine électrique et du tabouret isolant permet de démontrer d'une manière élégante les différences de conductibilité des diverses substances. Une personne se place sur le tabouret; elle prend successivement, avec l'une de ses mains, des baguettes de verre, de bois, de métal, avec lesquelles elle touche le conducteur d'une machine dont on fait tourner le

plateau; elle approche l'autre main d'un conducteur qui communique avec le sol. Selon la faculté isolante ou conductrice de la baguette, il y a ou il n'y a pas d'étincelle, et selon son degré de conductibilité il y a une étincelle plus ou moins longue. On peut même montrer la présence de l'étincelle en l'employant, quoiqu'elle sorte de la main, à mettre le feu à une substance inflammable, telle que de l'éther ou du gaz hydrogène. On démontre de la même manière, en les faisant communiquer par une de leurs extrémités avec le conducteur de la machine, et en les tenant d'une main par l'autre extrémité, la propriété isolante ou conductrice des fils de diverses substances, telles que le caoutchouc, la gutta-percha, la soie sèche ou humide, etc.

§ 2. Électroscopes.

Les électroscopes ou électromètres sont des appareils destinés à accuser la présence de l'électricité, à indiquer sa nature et à mesurer, si c'est possible, son intensité. Nous avons déjà parlé des électroscopes simples et de l'électromètre à cadran. Les autres sont en général fondés sur le principe que deux corps très-légers, librement suspendus et très-rapprochés l'un de l'autre, se repoussent mutuellement quand ils sont chargés de la même électricité, et cela à une distance d'autant plus grande que cette électricité est plus forte. Le plus simple est formé d'une tige de verre fixée verticalement sur un pied, et surmontée d'une petite traverse métallique horizontale, terminée d'une part par un bouton, et de l'autre par un crochet auquel on suspend un fil de lin dont les deux bouts sont tendus verticalement par deux balles de moelle de sureau fixées à chacune des deux extrémités (fig. 11). On touche avec le corps électrisé la traverse métallique, et aussitôt l'électricité se communique, à travers le fil de lin qui est conducteur, aux deux boules qui s'éloignent l'une de l'autre. Pour connaître la nature de l'électricité, on touche la traverse métallique pendant que l'électroscope est chargé

Fig. 11.

avec un bâton de cire électrisé; on donne ainsi à l'instrument de l'électricité négative. Si les deux boules se rapprochent, on en conclut que l'électricité dont l'instrument était chargé était positive; si elles s'éloignent davantage, on en conclut qu'elle était négative.

Pour rendre l'instrument plus sensible et plus exact, on renferme les deux corps légers dans une cloche de verre d'où sort une tige métallique qui les porte et qu'on touche avec la substance électrisée. Les corps légers eux-mêmes sont alors, ou les deux boules de moelle de sureau (fig. 12), ou deux brins de paille, comme dans l'électromètre de Volta (fig. 13), ou deux


Fig. 12.


Fig. 13.


Fig. 14.

lames d'or battu très-mince, comme dans l'électromètre de Bennet (fig. 14); dans ce dernier, deux petites tiges en métal, terminées chacune par un bouton, sont placées verticalement sur le pied de l'instrument, de chaque côté des feuilles d'or, de façon que, lorsque celles-ci divergent trop fortement, elles viennent en contact avec les tiges qui communiquent avec le sol et les déchargent. On évite ainsi les déchirures résultant de l'adhésion aux parois de la cloche de verre qu'éprouveraient les feuilles d'or par l'effet d'une électricité trop forte. Enfin, dans tous les électroscopes, une division circulaire permet de mesurer l'écartement angulaire des deux corps légers, des boules de sureau, des brins de paille ou des lames d'or. La tige métallique, dans l'électromètre à feuilles d'or, porte à son extrémité inférieure, qui pénètre dans le haut de la cloche, une pince au moyen de laquelle on fixe les deux lames d'or, et son extrémité supérieure, qui est hors de la cloche, se termine par un disque ou par un bouton. Pour que l'électricité qu'on donne au bouton


Fig. 15.

ne se perde pas et aille affecter les feuilles d'or, on a soin de placer la tige métallique elle-même dans un tube de verre qui la recouvre en entier, sauf à ses deux extrémités ; ce tube pénètre dans la cloche, à travers une virole métallique à laquelle il est cimenté au moyen d'une matière isolante, telle que la cire ou la gomme laque. La virole de même est fixée, au moyen de la cire, à la tubulure de la cloche(fig. 15).

Il est très-important que l'air soit très-sec, soit dans l'intérieur de la cloche, soit sur sa surface extérieure, afin que l'électricité ne se dissipe pas par le contact de l'air humide. Dans ce but, on place souvent l'électroscope lui-même tout entier dans une cage de verre remplie de chlorure de calcium ou de chaux vive qui dessèche bien l'air, en ayant soin de ne laisser sortir de la cage que le bouton ou le disque métallique par lequel on fait parvenir l'électricité aux feuilles d'or.

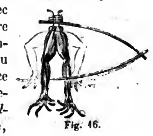
Avec les électroscopes sensibles, tels en particulier que celui à feuilles d'or, il n'est pas toujours nécessaire de toucher avec la substance électrisée la partie extérieure de la tige métallique qui porte les corps légers, pour faire passer dans ceux-ci l'électricité qu'on veut percevoir. Il suffit d'approcher la substance de la tige et, par un effet que nous étudierons bientôt, les feuilles d'or se trouvent posséder, pendant qu'elles sont sous cette influence, une électricité semblable à celle que possède la substance elle-même. De même, si l'électroscope est électrisé, il suffit d'approcher de lui, sans que le contact soit nécessaire, un corps dont l'électricité est connue pour juger, d'après la divergence plus grande ou plus faible des deux corps légers, quelle est la nature de l'électricité dont ils sont chargés.

Quoique le dégré de divergence des feuilles d'or et en général de tous les autres corps légers, soit en rapport avec l'intensité de l'électricité qui les anime, cette intensité est loin d'être exactement proportionnelle au nombre des degrés d'écartement. Aussi, à vrai dire, les instruments que nous venons de décrire méritent-ils plus le nom d'*électroscopes* que celui d'*électromètres* qu'il faut réserver aux appareils qui, tels que la balance élec-

trique de Coulomb, dont nous parlerons dans la partie suivante, donnent des indications proportionnelles à l'intensité de l'électricité dont on les charge.

§ 3. Pile voltaïque.

La pile voltaïque est, comme la machine électrique, un appareil dont on a constamment besoin dans l'étude de l'électricité; mais elle est fondée sur un autre mode de dégagement des fluides électriques. Le frottement n'est pas en effet la seule manière d'opérer ce dégagement; il en existe d'autres, en particulier l'élévation de la température et l'action chimique d'un corps sur un autre. Le simple contact de deux substances hétérogènes, tel que celui de deux métaux différents, est aussi, suivant quelques physiciens, une source d'électricité. Ce n'est pas le lieu d'étudier ici les divers modes de production de l'électricité; ce sujet sera traité dans la cinquième partie. Nous devons nous borner ici à dire que la pile voltaïque est un appareil dans lequel l'électricité est développée, suivant les uns, par le contact de deux métaux de nature différente, et, suivant les autres, par l'action chimique des liquides dont on la charge sur l'un des deux métaux qui entrent dans sa formation. Elle présente, en effet, ces deux circonstances réunies; nous verrons plus tard quelle part il faut faire à chacune; cela nous importe peu maintenant, puisqu'il ne s'agit que de la description de l'appareil. Ajoutons encore que la pile imaginée par Volta a pris naissance dans l'interprétation que le célèbre physicien donna d'une expérience remarquable faite par Galvani, savoir : qu'une grenouille éprouve une vive commotion quand on touche l'un de ses nerfs mis à nu avec un métal, et ses muscles avec un autre métal, les deux métaux étant en contact immédiat eux-mêmes en un ou plusieurs points de leur surface (fig. 16). Cet effet, dû à un dégagement d'électricité, a fait nommer *galvanique* l'électricité ainsi engendrée,


Fig. 16.

et *galvanisme* la partie de la physique qui s'en occupe; mais le nom de voltaïque doit rester à la pile, car Volta en est le véritable créateur.

La première forme qui fut donnée à la pile par Volta est celle d'une colonne verticale formée de disques de zinc et de cuivre de quatre à six centimètres de diamètre, disposés comme suit (fig. 17). La base de la colonne est un disque de cuivre sur lequel est placé un disque de zinc; la réunion de ces deux disques superposés forme un couple; sur ce premier couple on en place un second semblable, en ayant soin que le cuivre soit toujours au-dessous du zinc; on sépare le second couple du premier par une rondelle de drap ou de carton bien humectée avec de l'eau, ou, ce qui vaut mieux, avec de l'eau salée ou acide. Sur le second couple on en place un troisième disposé de même et séparé également par une rondelle humide de celui qui le précède. On superpose de cette manière un plus ou moins grand nombre de couples les uns au-dessus des autres, en ayant soin de les retenir au moyen de tiges de verres verticales; on trouve, si l'on a pris la précaution d'isoler la pile, en faisant reposer sa base sur une plaque de verre, qu'elle est chargée d'électricité négative à son extrémité inférieure terminée par le disque de cuivre, et d'électricité positive à son extrémité supérieure terminée par un disque de zinc. Ces extrémités s'appellent *pôles;* la première, pôle négatif, et la seconde, pôle positif de la pile. Si on avait placé les deux métaux dans un autre ordre, c'est-à-dire qu'on eût commencé par le zinc et placé sur lui le disque de cuivre, puis la rondelle humide, puis de nouveau zinc, cuivre et rondelle humide, et ainsi de suite, le pôle positif aurait été en bas, et le négatif en haut. Deux fils de métal partant, l'un du cuivre extrême, l'autre du zinc extrême, communiquent chacun l'électricité du pôle auquel ils aboutissent, et, quand on les rapproche, il part entre eux une étincelle résultant de la neutralisation des deux électricités contraires. Si l'on tient ces fils chacun dans une main, on éprouve, quand le nombre des couples de la pile est suffisamment considérable, une série de

Fig. 17.

commotions dont la sensation est quelquefois très-pénible. Quand, au lieu du corps humain, on emploie, pour réunir les deux conducteurs, un fil de fer, de platine ou de tout autre métal, très-fin, et d'une longueur de quelques centimètres, la neutralisation des deux électricités s'opère à travers ce fil qui s'échauffe et devient incandescent. La longueur et le diamètre du fil qui peut être chauffé sont d'autant plus considérables que la pile est plus forte. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que l'état incandescent du fil est permanent, parce que la neutralisation des deux électricités est continue, la pile les dégageant à chacun de ses pôles à mesure et aussi vite qu'elles se neutralisent.

On peut encore plonger les deux fils qui partent des pôles dans de l'eau qu'on a soin de saler ou d'aciduler légèrement pour la rendre meilleure conductrice. Dans ce cas, il faut que la partie immergée des deux fils soit en *or* ou en *platine*. Aussitôt on voit, par l'effet de la neutralisation continue des deux électricités qui s'opère à travers l'eau, celle-ci se décomposer et ses deux gaz constituants se dégager, l'un, l'oxygène, autour du fil qui communique avec le pôle positif, l'autre, l'hydrogène, autour du fil qui communique avec le pôle négatif; les deux gaz sont constamment dans les mêmes proportions qui constituent l'eau, c'est-à-dire un volume d'oxygène pour deux d'hydrogène. On a soin, pour les recueillir, de placer au-dessus de chacun des fils qui pénètrent intérieurement dans le vase qui renferme l'eau et auquel ils sont bien scellés, un tube fermé par en haut rempli du même liquide qui est dans le vase et qui est chassé par le gaz à mesure que celui-ci s'élève (fig. 18).


Fig. 18.

Les phénomènes que nous venons de décrire ne sont que des exemples des effets variés et nombreux que la pile peut produire, ou plutôt auxquels donne naissance la réunion continue des deux électricités, car la pile n'est ici qu'un moyen commode et puissant d'obtenir cette réunion continue, mais ce n'est pas le seul. Ces exemples nous suffisent pour le moment, car ils peuvent déjà nous permettre de trouver, dans les effets de la pile, les moyens d'en mesurer la puissance et de construire

les appareils qu'on a appelés *galvanomètres*, ou mieux encore *voltamètres*.

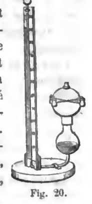
§ 4. Instruments destinés à mesurer la puissance de la pile voltaïque, soit voltamètres.

Le premier voltamètre, fondé sur les effets caloriques de la pile, fut imaginé par M Gaspard de la Rive ; il consiste en un fil fin de platine, tendu verticalement, et dont les deux extrémités aboutissent à des pièces métalliques séparées l'une de l'autre par un corps suffisamment isolant, tel que de l'ivoire ou de l'ébène (fig. 19). Le fil tient, par son bout inférieur, à une aiguille mobile dans un plan vertical autour de l'une de ses extrémités, tandis que l'autre extrémité parcourt les divisions d'un cercle gradué. Le point d'attache du fil à l'aiguille est très-rapproché de son centre de rotation. Il en résulte que de très-petites variations dans la longueur du fil de platine font parcourir à l'aiguille des arcs passablement grands sur la division. Les conducteurs partant des pôles de la pile sont mis en communication au moyen de pinces métalliques, l'un avec la partie inférieure, l'autre avec la partie supérieure du fil. Celui-ci s'échauffe plus ou moins, selon la puissance de la pile, et sa dilatation est appréciée par le nombre des degrés parcourus par l'aiguille de la division. On peut ajuster à l'instrument des fils de platine de différentes grosseurs, pour le rendre plus ou moins sensible ; le choix de ces fils dépend de la force des appareils, dont la puissance doit être appréciée de cette manière. Il est facile de déterminer la dilatation que le fil a éprouvée, et, par conséquent, la température approximative à laquelle il a été exposé, au moyen des sinus des arcs parcourus, et en connaissant la longueur absolue du fil.

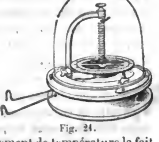
Fig. 19.

Un voltamètre plus sensible encore, et fondé sur le même principe, est celui dans lequel le fil de platine, destiné à servir

de lieu de passage à la réunion continue des deux électricités, traverse la boule d'un thermoscope à air, de façon que ses deux extrémités en sortent et qu'elles puissent être mises ainsi en communication chacune avec l'un des pôles de la pile (fig. 20). Le fil doit être scellé hermétiquement au verre dans les deux points où il traverse la boule. Dès qu'il s'échauffe, il dilate l'air renfermé dans la boule, effet qui est immédiatement accusé par la marche du liquide thermoscopique. On a souvent dans la même boule deux fils différents et indépendants, l'un plus fin que l'autre, afin de pouvoir, suivant la force de l'électricité, se servir d'un appareil plus ou moins sensible.


Fig. 20.

Un autre qui ne l'est pas moins, et dont les indications sont plus comparables, est un voltamètre que j'ai décrit avant même qu'on eût imaginé le précédent. Il consiste à se servir de l'hélice d'un thermomètre métallique de Bréguet, au lieu d'un fil de platine, pour apprécier, par l'effet calorique, l'énergie de l'électricité dynamique (fig. 21). L'hélice de Bréguet est composée de trois lames métalliques superposées, si étroites et si minces, que le plus léger changement de température la fait tordre et détordre, par l'inégale dilatabilité des trois métaux, *platine*, *or* et *argent*, dont elle est formée. L'hélice est fixée, par son extrémité supérieure, à un support métallique qu'on met en communication avec l'un des pôles de la pile. On soude à son extrémité inférieure, qui est libre, un petit fil de platine vertical qui plonge légèrement dans une capsule remplie de mercure, à laquelle aboutit l'autre pôle, au moyen d'un fil métallique. Cette même extrémité libre porte l'aiguille horizontale, qui, par le nombre des degrés qu'elle parcourt sur une division circulaire, indique l'élévation de température qu'a éprouvée l'hélice.


Fig. 21.

Telles sont les trois formes principales qu'on a données aux galvanomètres, soit voltamètres *calorifiques*, qui sont, comme leur nom l'indique, fondés sur les effets de chaleur auxquels l'électricité qu'engendre la pile peut donner naissance.

Les voltamètres qui sont fondés sur les effets chimiques ont pour base la mesure exacte de la quantité de gaz dégagée pendant un temps donné, toujours le même (une minute, par exemple), dans la décomposition de l'eau, ou mieux encore l'appréciation du temps nécessaire pour le dégagement d'une même quantité de gaz. Il faut donc recueillir ces gaz avec soin, n'en point laisser perdre et apprécier exactement leur volume en tenant compte de la pression atmosphérique et de la température. Ce n'est pas tout. La quantité de gaz dégagée pendant le même temps dans la décomposition de l'eau, ne dépend pas seulement de la force de la pile qu'on emploie, mais aussi du degré d'acidité de l'eau soumise à l'expérience, et de la nature et de la grandeur des fils métalliques qu'on y plonge pour la mettre en communication avec les pôles de l'appareil, et enfin de la distance qui sépare ces fils ou lames. Aussi, pour que des expériences soient comparables, il est nécessaire de se servir, pendant toute leur durée, du même appareil, ou d'appareils parfaitement semblables. Quant à l'eau, on prend de l'eau distillée, à laquelle on mélange une certaine proportion d'acide sulfurique très-pur, pour la rendre suffisamment conductrice; on en met environ un dixième en volume, soit un vingtième en poids. Au moyen d'un aréomètre, il est facile de retrouver l'eau toujours acidulée au même degré. Le métal dont on se sert est toujours du platine, soit en fils, soit en lames; ces fils sont placés verticalement dans un verre, l'un près de l'autre; leur extrémité inférieure sort du fond du vase, pour qu'on puisse établir une communication entre eux et les pôles de la pile. On recueille les gaz, ou dans deux tubes (fig. 18), ou dans un seul placé au-dessus des deux fils également (fig. 22). Les tubes doivent être gradués avec soin. On recueille aussi les gaz quand le dégagement gazeux est très-abondant, dans les éprouvettes graduées placées sur la cuve pneumatique, et au-dessous

du voltamètre (fig. 23). Quand, au contraire, le dégagement gazeux est très-faible, on mesure les gaz par le déplacement qu'ils produisent sur le liquide. Dans ce but, il part de la partie inférieure du flacon où s'opère la décomposition, un tube latéral dans lequel s'élève le liquide chassé par le gaz, qui se loge lui-même dans la partie supérieure qui est hermétiquement fermée (fig. 24). Il faut, avec cet appareil, apprécier l'influence que peut avoir sur le volume du gaz la pression exercée par la colonne liquide soulevée dans le tube latéral.



Fig. 22.

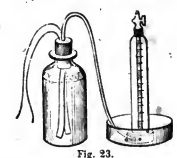


Fig. 23.

Tous ces voltamètres, aussi bien les chimiques que les calorifiques, sont loin d'être des instruments parfaits, car rien ne prouve que leurs indications soient exactement proportionnelles à l'intensité de la cause qu'ils sont destinés à mesurer. Et d'ailleurs ces indications elles-mêmes sont souvent variables par l'effet de circonstances de diverses natures que nous serons appelé à étudier et apprécier plus tard.

Ajoutons qu'il est un galvanomètre, le plus parfait de tous, que nous n'avons pas mentionné, parce que nous devons nous en occuper d'une manière toute spéciale dans la troisième partie de cet ouvrage; c'est celui qui est fondé sur la propriété que possède tout conducteur, traversé par un courant électrique,



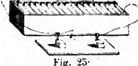
Fig. 24.

de dévier une aiguille aimantée de sa direction naturelle du sud au nord, quand on le place parallèlement à cette aiguille, au-dessus et au-dessous d'elle; cet instrument a reçu, par l'usage, le nom de *galvanomètre magnétique* ou *multiplicateur*.

§ 5. Formes diverses données à la pile voltaïque.

La forme de colonne que Volta avait donnée à son appareil fut bientôt abandonnée; elle avait plusieurs inconvénients, sans compter le temps très-long qu'il fallait mettre à monter l'appareil chaque fois qu'on voulait l'employer. Le principal de ces inconvénients était la dessiccation rapide des rondelles de drap ou de carton mouillées, d'où résultait une grande diminution dans la puissance de la pile.

Pour y remédier, on imagina de remplacer ces rondelles par une couche liquide, ce qui exigeait nécessairement que la pile, de verticale qu'elle était, fût rendue horizontale, et que les couples, formés alors chacun, non plus de deux disques, mais de deux plaques rectangulaires en contact, fussent cimentés les uns à la suite des autres dans les rainures d'une auge en bois, de manière à laisser entre eux un espace vide, soit des cellules, qu'on remplissait de liquide (fig. 25). Il fallait avoir soin que les plaques fussent soudées avec assez de soin contre les parois de l'auge, pour qu'il n'y eût aucune communication entre le liquide d'une cellule et celui de la suivante. Ce mode de construction, indiqué d'abord par Cruikshanks, fut adopté pour l'établissement de la grande pile voltaïque que l'empereur Napoléon donna à l'École polytechnique, et avec laquelle MM. Gay-Lussac et Thénard firent leurs expériences en 1808.


Fig. 25.

Cette forme avait toutefois plusieurs des inconvénients de la forme primitive, notamment celui de demander beaucoup de temps pour monter l'appareil, et celui de laisser s'établir, quand les plaques n'étaient pas bien scellées, une communication entre les liquides des cellules, ce qui diminuait notablement les effets électriques. On revint alors à une forme que

Volta avait déjà indiquée en construisant sa pile dite à *couronne de tasses*, pile dans laquelle on place les liquides dans des vases indépendants des plaques métalliques, et dont les parois en verre, en porcelaine ou en terre de pipe, permettent de les mettre les uns à la suite des autres, et même en contact, sans qu'il en résulte aucune communication entre les couches liquides qu'ils renferment. On se sert, dans ce but, ou d'une suite de verres cylindriques ordinaires, comme dans la pile à couronne de tasses, ou d'une auge en porcelaine, partagée par des cloisons fabriquées avec l'auge en un certain nombre (dix ordinairement) de cellules ou de compartiments égaux et successifs, de forme rectangulaire, dans chacun desquels on verse le liquide, en ayant soin de ne pas les remplir complétement. Les liquides sont ainsi totalement isolés les uns des autres. Quant aux plaques métalliques, comme on s'était bien vite aperçu qu'il n'était pas nécessaire que le zinc et le cuivre de chaque couple fussent en contact sur toute leur surface, mais qu'il suffisait qu'ils le fussent en quelques points seulement, cela fit qu'on put plonger dans le liquide de chaque compartiment une plaque de zinc et une plaque de cuivre, et faire communiquer, au moyen d'une petite lame de cuivre en forme d'arc, le zinc d'un compartiment avec le cuivre du suivant, et ainsi de suite. C'est ce qui a lieu dans la pile à couronne de fosses (fig. 26). De

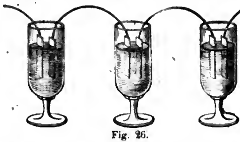


Fig. 26.

cette façon, la couche liquide se trouvait bien, comme dans la pile primitive, entre le zinc d'un couple et le cuivre du suivant, et le zinc et le cuivre, plongés dans le même liquide, ne se trouvent jamais en contact métallique, ainsi que cela doit être. Mais, pour faciliter les opérations, on a soin, dans les piles

à auges (fig. 27), de fixer les couples, qui sont à nombre égal de celui des compartiments de l'auge (dix par exemple), à une baguette de verre ou de bois verni; on les y fait tenir au moyen de l'arc en cuivre qui fait communiquer ensemble les deux métaux du couple. Les plaques métalliques doivent être disposées à la suite les unes des autres dans l'ordre convenable et à des distances telles que l'on puisse, en tenant par les mains les deux extrémités de la baguette à laquelle ils sont fixés, les plonger toutes à la fois dans leurs auges respectives et de manière que chacune occupe la place qui lui convient; c'est-à-dire qu'il ne se trouve jamais dans le même liquide que le zinc du couple précédent et le cuivre du suivant ou réciproquement.

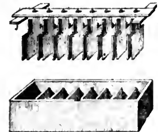


Fig. 27.

Dans la pile que nous venons de décrire, chaque auge renferme dix compartiments, et par conséquent dix couples; mais on peut mettre plusieurs de ces auges les unes à la suite des autres, en ayant soin que le zinc du couple, dont le cuivre plonge dans le dernier compartiment d'une auge, soit lui-même placé dans le premier compartiment de l'auge suivante et ainsi de suite. L'Institution royale de Londres, dont le laboratoire a successivement servi aux beaux travaux de Davy et de Faraday, possédait une pile construite suivant le mode que nous venons de décrire et composée de deux mille couples. C'est avec cette pile que Davy fit ses belles expériences et notamment celle de l'arc lumineux qui s'échappe entre deux pointes de charbons très-rapprochées et communiquant chacune avec l'un des pôles de la pile.

Wollaston trouva que l'effet de la pile était augmenté si l'on donnait au cuivre une surface plus grande qu'au zinc; modification facile à introduire sans rien changer à la forme de l'appareil ni à la grandeur des cellules, en enveloppant la plaque de zinc de chaque couple de la plaque de cuivre du couple précédent, mais en prenant en même temps bien soin d'éviter tout

contact métallique entre ces deux lames (fig. 28). De cette ma-

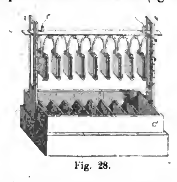


Fig. 28.

nière, la plaque de cuivre avait une surface double de celle de la plaque de zinc. Berzelius avait imaginé de se servir du cuivre même qui enveloppe le zinc sans le toucher, comme d'une cellule ou d'un vase destiné à renfermer le liquide (fig. 29). Cette disposition avait bien l'avantage d'augmenter

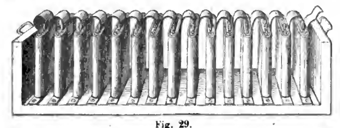


Fig. 29.

la puissance de la pile, mais elle présentait pour la manipulation quelques inconvénients qui ont empêché qu'on ne l'adoptât généralement.

Deux formes qui ont été longtemps usitées pour la pile sont celles d'hélice (fig. 30) et de cylindres concentriques (fig. 31). La première, employée par le docteur Hare ; la seconde, par M. Pouillet, pour la construction d'une grande pile, de la Faculté des sciences de Paris. Le zinc et le cuivre tournés en hélice ou disposés en cylindres concentriques plongent dans un bocal de verre et ne doivent avoir aucun contact métallique l'un avec l'autre ; mais l'hélice ou les cylindres de zinc de l'un des vases communiquent métalliquement avec l'hélice ou les

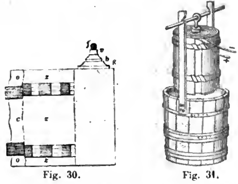


Fig. 30. Fig. 31.

cylindres de cuivre du suivant, et ainsi de suite. Par cette disposition, on peut donner une grande surface aux deux métaux de chaque couple sans qu'il en résulte la nécessité d'avoir de très-grandes auges ; l'emploi des bocaux cylindriques est aussi un avantage à cause de la facilité qu'on a de s'en procurer.

Quant au conducteur liquide, l'expérience avait montré que le meilleur à employer pour charger les différentes piles que nous venons de décrire, était un mélange d'eau avec un quarantième en volume d'acide sulfurique et un soixantième d'acide nitrique.

§ 6. Piles à force constante.

Les piles que nous venons de décrire et dont on s'est longtemps exclusivement servi, ont toutes un inconvénient, c'est qu'elles perdent au bout de peu d'instants leur puissance, et qu'en général leur force est très-variable pendant la durée d'une même expérience, lors même que cette durée ne dépasse pas dix ou quinze minutes. Cette diminution graduelle et souvent rapide tient à plusieurs causes, dont la principale est que le liquide placé entre les couples se décompose quand les pôles de la pile sont réunis par un conducteur, de la même manière que se décompose le liquide qu'on interpose entre les pôles eux-mêmes ; il en résulte que le cuivre de chaque couple se couvre d'hydrogène et même d'oxyde de zinc provenant de la décomposition de l'eau et de celle du sulfate de zinc qui est constamment formé par l'action de l'acide sulfurique sur le zinc. Ce

dépôt, en altérant la surface du cuivre et en la rendant presque semblable à celle du zinc qui, elle-même, de son côté, est bien vite oxydée, détruit en grande partie l'une des conditions essentielles de la construction d'une pile, l'hétérogénéité des deux métaux, et en affaiblit par conséquent notablement la puissance. Aussi était-on obligé de nettoyer les plaques d'une pile chaque fois qu'on s'en était servi avant de la remettre en activité.

Daniell, le premier, imagina en 1836, pour éviter l'inconvénient que nous venons de signaler, de plonger le cuivre de chaque couple dans un liquide différent de celui dans lequel le zinc était plongé; il plaça le premier de ces métaux dans une dissolution de sulfate de cuivre, et le second dans une solution étendue d'eau et d'acide sulfurique, ou dans une solution de sel marin. La difficulté était de séparer ces deux liquides par une substance qui, tout en empêchant leur mélange, n'altérât pas la conductibilité du conducteur liquide hétérogène interposé entre les plaques des couples. On ne pouvait songer à un diaphragme métallique, car on aurait violé une des conditions fondamentales de la construction de la pile, qui exige qu'il y ait un conducteur totalement humide entre les couples. Daniell eut recours à une substance organique suivant la méthode qu'avait indiquée le premier M. Becquerel; et il fit des diaphragmes avec des vessies, du fort papier, du bois très-mince, ou de la toile très-serrée, etc. L'usage a fait donner la préférence aux diaphragmes en bois minces, en tilleul, par exemple, ainsi qu'à ceux en vessie; seulement il faut avoir soin de les préserver de gerçures et de toute solution de continuité en général; dans ce but, il est nécessaire de tenir constamment les diaphragmes en bois dans de l'eau, quand on ne s'en sert pas, et de mettre ceux en vessie à l'abri de l'attaque des insectes et du contact de tout corps étranger. La difficulté qu'on éprouve à prendre ces précautions a fait adopter à plusieurs physiciens, comme l'avait fait Daniell lui-même, les diaphragmes en terre poreuse non vernie; mais la pile perd beaucoup de sa puissance, surtout pour les effets calorifiques et chimiques. Daniell a donné aux couples de la pile la forme cylindrique, à cause de la faci-

lité plus grande qu'on a à se procurer des diaphragmes de cette forme. Dans sa pile (fig. 32), un cylindre creux en cuivre

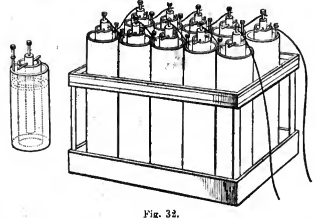


Fig. 32.

plonge dans un bocal en verre, plein d'une dissolution de sulfate de cuivre ; dans l'intérieur du cylindre, on place, ou un sac en vessie, ou un tube en bois, ou un cylindre creux en terre poreuse, qu'on remplit d'eau acidulée ou salée ; enfin dans cette eau plonge un cylindre de zinc qui communique métalliquement avec le cuivre du couple suivant, au moyen d'un godet rempli de mercure, dans lequel aboutissent deux appendices en cuivre fixés l'un au zinc, l'autre au cuivre. Le cylindre de zinc peut être plein ou creux ; dans ce dernier cas, c'est une simple feuille de zinc laminée tournée en cylindre. Ce dernier mode est préférable, parce que le zinc se trouve avoir plus de points de contact avec le liquide, mais il se consomme plus vite, en fournissant, il est vrai, une proportion d'autant plus grande d'électricité.

Une autre grande amélioration introduite dans la pile de Daniell, comme aussi dans celles dont nous parlerons plus tard, consiste à amalgamer le zinc, c'est-à-dire à le recouvrir d'une couche de mercure, ce qui est facile à faire, en versant sur le zinc à la fois le mercure et de l'acide sulfurique étendu de vingt fois environ son volume d'eau, afin que la surface du zinc soit bien désoxydée et suffisamment nette, pour que le mercure

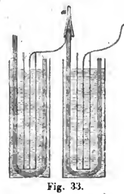
y adhère. L'avantage de cette opération imaginée par un physicien anglais, M. Kemp, c'est que, sans rien changer à l'effet du zinc, dans la production de l'électricité par la pile, on évite qu'il soit attaqué et que par conséquent il se dissolve en pure perte dans de l'eau acidulée, quand la pile n'est pas en activité, c'est-à-dire quand ses pôles ne sont pas réunis par un conducteur. Mais dès que cette réunion a lieu, le zinc est attaqué malgré le mercure dont il est recouvert; seulement l'oxyde qui se forme ne reste point adhérent à la surface qui demeure toujours brillante et métallique ; circonstance encore éminemment avantageuse, car la couche d'oxyde, qui recouvre les plaques de zinc quand elles ne sont pas amalgamées, contribue notablement à l'affaiblissement de la pile. Quant au cuivre, comme il plonge dans du sulfate de cuivre, c'est de cuivre métallique qu'il se recouvre par la décomposition de ce sulfate, pendant que la pile est en activité ; sa surface n'est donc point altérée.

On conçoit donc que la puissance de la pile de Daniell soit constante, du moins pendant un temps assez long; il arrive cependant, au bout d'une heure ou deux, que les dissolutions s'épuisent et qu'il faut les renouveler; elles finissent aussi par se mélanger plus ou moins vite, suivant la nature du diaphragme, l'une avec l'autre; alors il faut, non-seulement les changer totalement, mais laver avec soin les diaphragmes et nettoyer les surfaces des métaux. Il est préférable de ne pas attendre, pour démonter la pile et renouveler les liquides, que ce mélange ait eu lieu. Toutefois nous verrons, quand nous nous occuperons de la télégraphie électrique, qu'on est parvenu, par quelques modifications dans son mode de construction, à donner à la pile de Daniell une constance d'une durée remarquable.

Une seconde pile à effet constant, et dans laquelle on emploie également deux liquides différents, est celle de Grove. Dans cette pile, le zinc est amalgamé comme dans la précédente, et plonge dans de l'acide sulfurique étendu de dix à vingt fois son volume d'eau. L'autre métal est du platine et non du cuivre, et il plonge dans de l'acide nitrique, soit pur à 40°, soit étendu de la moitié de son volume d'eau ou mélangé avec

un quart d'acide sulfurique concentré. Le diaphragme qui sépare les deux liquides n'est pas dans ce cas de nature organique, car il serait immédiatement détruit par l'action de l'acide nitrique; il est de porcelaine ou de terre de pipe non vernie; dans cet état, ces substances ont l'avantage d'être suffisamment poreuses pour permettre la communication des liquides entre eux, tout en prévenant leur mélange.

Dans la pile de Grove, les couples (fig. 33) ne sont pas généralement de forme cylindrique, quoique cependant on en ait aussi construit de cette forme; ce sont des lames de zinc et de platine qui plongent dans des cellules de porcelaine vernie ou de verre. Chaque cellule contient l'acide sulfurique étendu dans lequel le zinc est immergé, et une petite auge en terre poreuse remplie intérieurement d'acide nitrique. C'est dans cet acide qu'est placée la lame de platine, qui est en contact métallique avec le zinc de la cellule précédente ou suivante. Ce contact s'établit entre les deux bords des lames de zinc et de platine qu'on a soin de bien nettoyer, au moyen de pinces de métal ou simplement de bois. L'expérience a montré qu'on augmentait beaucoup la puissance de ces piles, en donnant aux lames de zinc une très-grande surface par rapport aux lames de platine. Dans ce but, on les courbe de façon à ce qu'elles forment, dans chaque cellule, deux surfaces parallèles verticales, réunies par une horizontale inférieure beaucoup plus petite; c'est dans l'intervalle que laissent entre elles les deux surfaces parallèles, qu'on place l'auge en terre poreuse qui contient l'acide nitrique et la lame de platine.


Fig. 33.

Quand la pile de Grove est en activité, c'est-à-dire que ses pôles sont réunis, l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau acidulée dans laquelle plongent les métaux des couples ne se porte point sur le platine, mais change l'acide nitrique en acide nitreux; l'oxyde de zinc reste également dans le liquide où est le zinc lui-même et ne pénètre point à travers la paroi

poreuse jusqu'au platine. Celui-ci garde donc une surface parfaitement nette; et c'est cette circonstance qui contribue essentiellement à maintenir à cette pile, pendant un temps plus ou moins long, suivant l'usage qu'on en fait, cette puissance à la fois si constante et si énergique, qui la rend d'un emploi si précieux. Seulement l'acide nitrique, en se changeant en acide nitreux par l'action de l'hydrogène, passe au rouge brun, puis au vert, et finit par prendre une température si élevée, qu'il entre en ébullition; il faut dans ce cas, arrêter immédiatement l'action de la pile.

La pile de Bunzen ne diffère de celle de Grove qu'en ce que le platine y est remplacé par du charbon. Cette substitution a pris naissance essentiellement à cause du prix élevé du platine, qu'on emploie par cette raison en feuilles si minces, que souvent elles se déchirent. La pile de Bunzen a la forme cylindrique de celle de Daniell; en effet, si l'on remplace dans cette dernière le cylindre creux de cuivre par un cylindre creux en charbon, la dissolution de sulfate de cuivre par de l'acide nitrique pur ou étendu, le cylindre poreux de matière organique, dans lequel se trouve l'acide sulfurique étendu et le cylindre de zinc amalgamé, par un cylindre en terre poreuse, on a la pile de Bunzen (fig. 34). Chaque cylindre de charbon porte à sa partie

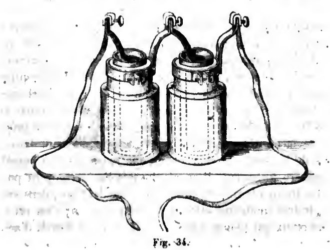


Fig. 34.

supérieure un collier de cuivre muni d'un appendice qu'on met en contact, au moyen d'une pince, avec un appendice semblable que porte chaque cylindre de zinc; il faut seulement avoir soin que le cylindre de charbon soit assez haut pour que la partie qui porte l'anneau de cuivre sorte du bocal de verre, et ne se trouve par conséquent nullement en contact avec l'acide nitrique. Cependant, le charbon étant très-poreux, la capillarité fait que l'acide finit par atteindre le haut du cylindre et par altérer intérieurement l'anneau de cuivre. Il faut donc, chaque fois qu'on a fait usage de cette pile, enlever ces anneaux, les laver et les essuyer avec soin.

Une disposition plus commode, parce qu'elle est à l'abri du genre d'inconvénient que nous venons de signaler, est celle qui a été imaginée par M. Bonijol (fig. 35). Cet artiste habile

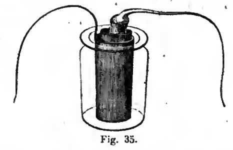


Fig. 35.

emploie, au lieu de cylindres creux, des cylindres pleins de charbons dans le sommet desquels est implantée une forte tige en cuivre recourbée pour être mise en communication, au moyen d'un godet plein de mercure, avec une tige semblable qui est soudée au cylindre de zinc. Le haut du cylindre de charbon est recouvert, tout autour de la place dans laquelle se trouve insérée la tige de cuivre, d'une couche faite avec une cire préparée, de façon à pouvoir pénétrer assez profondément dans les pores de la partie du charbon qu'elle recouvre et à laquelle elle adhère fortement. Il en résulte que l'acide ne peut point arriver jusqu'à la tige de cuivre. Il est évident que, dans cette pile, le zinc amalgamé est extérieur au charbon; c'est un cylindre creux qui plonge dans le bocal de verre rempli d'acide sulfurique étendu; le tube poreux est placé dans l'intérieur du

cylindre de zinc, et reçoit lui-même le charbon et l'acide nitrique dans lequel celui-ci doit plonger.

La préparation des charbons est difficile quand il s'agit de cylindres creux, comme dans la pile de Bunzen. Il faut pour cela des moules en fer, puis du coke en poudre fine qu'on pousse par une ou deux opérations à une haute température, après l'avoir mélangé avec du sucre ou de la mélasse pour établir un liant qui donne de la consistance au tout. Dans la pile de Bonijol, on peut préparer les cylindres de charbon de la même manière, ce qui est plus facile, parce qu'ils sont pleins; mais il est encore plus simple de prendre des morceaux de coke bien recuits, d'une bonne qualité et de dimensions suffisantes. On les taille aussi bien qu'on le peut en forme de cylindre, sans pouvoir, il est vrai, jamais leur donner exactement cette forme, qui du reste est de peu d'importance.

M. Delœil construit actuellement à Paris des piles de ce genre dans lesquelles le charbon est parfaitement cylindrique et a été préparé suivant le procédé indiqué. Une disposition très-simple permet d'établir d'avance le contact entre le charbon et le zinc de chaque couple, et de fixer les couples eux-mêmes sur des cadres fixes, de telle façon que, pour mettre la pile en activité, il n'y a qu'à soulever une table en bois qui porte les vases remplis de leur liquide, dans lesquels viennent plonger le charbon et le zinc, chacun dans celui qui lui convient.

Telles sont les différentes espèces de piles dont on se sert le plus ordinairement, et qui toutes se trouvent plus ou moins dans les cabinets de physique et dans les laboratoires de chimie. Il y en a cependant encore quelques autres dont on se sert uniquement dans certaines applications pratiques, et dont nous renvoyons à parler quand nous nous occuperons de ces applications.

Nous ne nous occuperons pas davantage actuellement de quelques combinaisons voltaïques qui ont un intérêt purement théorique et dont la description trouvera sa place quand nous traiterons la théorie de la pile. Toutefois nous mentionnerons encore, comme étant d'un emploi assez général, la pile Smee,

dont les couples faits de zinc amalgamé et de lames d'argent platiné, c'est-à-dire d'argent recouvert d'une couche de poudre noire de platine, plongent dans un seul et même liquide, l'acide sulfurique étendu, et conservent cependant une constance remarquable.

§ 7. Énumération des différentes piles voltaïques et considération générale qui leur est commune à toutes.

En résumé, les piles voltaïques que nous venons de décrire sont :

1° La pile à colonne de Volta, célèbre parce qu'elle fut la première et qu'elle représente la forme sous laquelle son illustre inventeur réalisa son idée.

2° La pile à auges en bois et à couples métalliques fixes, forme sous laquelle fut construite la grande pile, donnée, en 1806, à l'École polytechnique par l'empereur Napoléon.

3° La pile à auges indépendantes en verre ou en porcelaine avec couples métalliques mobiles, forme sous laquelle fut construite la piles de deux cents couples de l'Institution royale de Londres, au moyen de laquelle Davy fit les grandes découvertes qui ont immortalisé son nom.

4° La pile à auges de cuivre de Berzelius qui servit essentiellement aux premières expériences de l'électro-magnétisme.

5° La pile à force constante de Daniell avec diaphragmes organiques poreux et deux liquides, sulfate de cuivre pour le cuivre, et eau acidulée ou salée pour le zinc, forme éminemment utile pour les expériences de longue durée, et en particulier pour celles qui concernent l'étude des effets chimiques du courant.

6° La pile à force constante de Grove dans laquelle, comme dans celle de Daniell, on fait usage de deux liquides et d'un diaphragme, avec cette différence que le cuivre y est remplacé par le platine, le sulfate de cuivre par l'acide nitrique, et que le diaphragme poreux y est de terre dégourdie non vernie ; pile de toutes la plus propre à la production des effets du courant électrique à cause de son énorme puissance, réunie à une con-

stance qui, quoique moindre que dans la pile de Daniell, est suffisante pour la plupart des cas, et notamment dans l'enseignement public.

7° La pile à force constante de Bunzen, qui n'est qu'une modification de celle de Grove, par la substitution du charbon au platine; elle est plus longtemps constante, mais moins énergique dans ses effets que celle de Grove. Elle est également très-usitée, surtout en Allemagne, et elle se trouve, avec celle de Daniell, aussi bien dans l'atelier de l'industriel que dans le cabinet du savant et du professeur. La pile de Bonijol et celle de Delœil ne diffèrent de celle de Bunzen que par la forme et la place donnée au charbon.

C'est ici le moment de présenter une remarque générale commune à toutes les piles et dont l'importance n'échappera pas à ceux qui se servent de ces appareils. Il s'agit de savoir exactement ce qui détermine dans chacune la place du pôle positif et celle du pôle négatif. L'emploi de certaines dénominations fautives, joint à la préoccupation provenant de certaines théories, a jeté sur ce point, si simple et si essentiel, une obscurité qui ne devrait pas exister et qu'il est indispensable de faire disparaître.

Il entre dans la construction de toutes les piles dont nous avons parlé (qu'elles renferment un ou deux conducteurs liquides), deux solides de nature différente, l'un plus oxydable que l'autre, presque toujours le zinc, l'autre moins oxydable, le cuivre, le platine ou le charbon. Ces corps solides, que nous supposerons, pour plus de facilité dans l'explication, être le zinc et le cuivre, sont en communication métallique deux à deux, de manière à former des couples qui se suivent et qui sont séparés les uns des autres par *le* ou par *les deux* liquides. On a toujours soin de placer les deux corps solides du couple dans le même sens, de façon, par exemple, que, dans chaque couple, chaque zinc soit au-dessus de chaque cuivre si la pile est en colonne, ou à droite de chaque cuivre si la pile est horizontale.

L'inverse peut également avoir lieu, mais il faut que le rang, quel qu'il soit, que les deux métaux occupent l'un par rapport à l'autre, demeure le même dans tous les couples. Il résulte de

là que dans les piles horizontales, les seules usitées maintenant, chaque cellule contient, outre le liquide, les deux corps solides de nature différente et jamais les deux de même espèce. Quant aux deux cellules extrêmes, elles renferment, l'une, outre le cuivre du couple dont le zinc plonge dans la cellule précédente, un zinc auquel est soudé un conducteur; l'autre, outre le zinc du couple dont le cuivre plonge dans la cellule qui la suit, un cuivre auquel est également soudé un conducteur. Ce sont ces deux conducteurs qui apportent les deux électricités produites par l'appareil et accumulées à ses deux extrémités ou pôles, qu'on appelle les *électrodes* de la pile; l'un est l'électrode positif et l'autre le négatif.

Dans la pile à colonne, le zinc extrême est encore en contact avec un cuivre qui lui-même n'est en communication avec aucun conducteur liquide, et le cuivre extrême avec un zinc qui est dans le même cas; mais, dans la pile horizontale, on supprime ce cuivre et ce zinc que l'expérience a montré n'être d'aucune utilité. Cette suppression ne change point la nature des pôles, de sorte que, tandis que dans la pile à colonne c'est à une plaque de cuivre qu'est le pôle négatif, et à une plaque de zinc le pôle positif, dans les piles horizontales c'est au dernier zinc que se trouve le pôle négatif, et au dernier cuivre le pôle positif. Il est résulté souvent de cette circonstance quelque confusion, surtout quand, au lieu d'employer les mots de positif et de négatif, on a voulu désigner les pôles par les noms des métaux, tels que *pôle zinc* et *pôle cuivre*. Il ne faut donc pas lier à la nature de la substance qui termine la pile à chacune de ses extrémités, la nature de l'électricité qui s'y trouve accumulée, car, comme on vient de le voir, on pourrait faire de graves erreurs. Il faut la lier à l'ordre suivant lequel sont placées les substances solides, et se rappeler que le pôle positif est toujours à celle des extrémités de la pile vers laquelle les zincs de chaque couple sont tournés, et le pôle négatif à celle vers laquelle tous les cuivres sont tournés; et cela, quelle que soit la matière dont la pile se termine, que ce soit par une plaque de zinc ou par une plaque de cuivre. Si les zincs de chaque couple sont tournés à gauche d'une personne qui regarde la pile et les cuivres,

par conséquent à la droite de la pile, le pôle positif sera à celles des extrémités de l'appareil qui est à la gauche de l'observateur, et le négatif à celle qui est à sa droite. Si la pile au lieu d'être rangée sur une même ligne droite revient sur elle-même et est disposée dans une direction quelconque, on n'a qu'à regarder de quel côté sont tournés tous les zincs, et se rappeler que le pôle positif est de ce côté comme aussi que le pôle négatif est du côté où sont tournés les cuivres. De cette manière, on est sûr de ne jamais faire d'erreur.

Enfin, il est bon de savoir que pour les effets dynamiques, on peut faire usage quelquefois d'une pile composée d'un seul couple; ainsi la première pile à hélice de M. Hare (fig. 30) ne se composait que d'un couple à grandes surfaces; et comme ce couple était éminemment propre à produire les effets d'incandescence des fils métalliques, l'auteur l'avait nommé *déflagrateur*. Dans le cas d'un seul couple, on a une auge unique dans laquelle plongent séparément les deux corps solides qui ne sont point en contact immédiat. De chacun d'eux part un conducteur métallique, et la substance conductrice placée entre ces deux conducteurs est traversée par un courant électrique. Si cette substance est un fil fin de métal, il s'échauffe et peut rougir pourvu que le couple soit fort; si c'est de l'eau acidulée, elle est décomposée; mais ce dernier phénomène ne peut avoir lieu qu'autant que le couple unique est un couple de Grove ou de Bunzen. Dans le cas de la décomposition de l'eau par un seul couple, on voit l'hydrogène s'accumuler autour du fil de platine qui part du zinc du couple et l'oxygène autour de celui qui part du platine ou du charbon. Ainsi l'électricité négative part du zinc et la positive du platine ou du charbon. C'est au reste ce qui a lieu également, ainsi que nous venons de le voir dans une pile de plusieurs couples, si l'on a soin de supprimer le cuivre en contact avec le dernier zinc et le zinc en contact avec le dernier cuivre que Volta avait cru nécessaires et qui se trouvaient dans sa pile à colonnes, mais que nous avons dit être parfaitement inutiles, et qui n'existent jamais dans les piles à auge.

Il est important de ne pas oublier que, lorsqu'il s'agit d'une

pile composée de plusieurs couples, ce qu'on nomme *le couple* n'est pas l'ensemble des deux métaux qui plongent dans la même cellule, mais qu'il est formé des deux métaux en contact métallique, immergés chacun dans des cellules différentes, de manière que la même cellule renferme deux métaux appartenant à deux couples différents; tandis que, lorsque la pile est composée d'un seul couple, nécessairement les deux métaux de ce couple unique plongent dans la même cellule, et le contact est établi entre eux par le conducteur que traversent les deux électricités pour se réunir l'une avec l'autre.

Nous n'avons point, dans ce qui précède, apprécié d'une manière exacte le mérite comparatif de chaque espèce de pile; cette appréciation, qui trouvera sa place plus tard, exigerait en effet, pour être bien faite, qu'on tînt compte à la fois et de l'intensité des effets et de la dépense de l'appareil, dépense qu'on estime par la consommation plus ou moins rapide du zinc et des acides. Il existe, d'ailleurs, un élément important qui doit entrer en ligne de compte, c'est le temps. La même quantité d'électricité dont le développement correspond à une même dépense de l'appareil, peut produire des effets très-différents selon qu'elle est dégagée dans un temps plus long ou plus court. Cette différence dépend de la nature des effets. Aussi le point auquel nous venons de toucher ne peut être traité maintenant; il pourra être développé avec plus de connaissance de cause quand, après avoir étudié en détail les différents phénomènes que produit l'électricité dynamique, nous nous occuperons d'une manière plus approfondie que nous n'avons pu le faire dans cette première partie des sources mêmes de l'électricité, et par conséquent de la théorie des appareils qui la produisent.

§ 8. Piles à tension, pile sèche, et électroscope à pile sèche.

Les effets dynamiques de l'électricité n'exigent pas, pour être produits, l'emploi d'un grand nombre de couples; plusieurs d'entre eux se manifestent d'une manière très-énergique, même avec un seul couple. Mais il n'en est pas de même des effets statiques; pour qu'il puisse y avoir une accumulation un peu

forte d'électricité positive et d'électricité négative à chacun des pôles d'une pile, il faut que la pile soit composée d'un nombre de couples considérable et que ses différentes parties soient aussi isolées que possible. Cet isolement est souvent difficile à obtenir à cause de la présence du liquide dont la pile doit être nécessairement chargée; en effet, le liquide, si l'on n'a pas soin de prendre beaucoup de précautions, risque d'établir entre les cellules qui le renferment une communication autre que celle qui résulte du contact des plaques métalliques de chaque couple, la seule qui doive exister. M. Gassiot a réussi en se servant de cellules de verre supportées elles-mêmes sur des tiges de verre, afin de rendre l'isolement plus complet, à obtenir avec une pile de Grove de 100 couples des effets de tensions assez considérables. Il a également construit une pile de 3,520 couples zinc et cuivre chargée uniquement avec de l'eau pure, et dont les cellules sont des verres ordinaires recouverts d'une couche de vernis à la gomme laque, afin de rendre l'isolement plus parfait.

Cette pile, depuis plusieurs années qu'elle est montée, donne constamment des étincelles électriques à chacun de ses pôles qui sont isolés. La seule précaution à prendre, c'est de remettre de temps en temps de l'eau dans les auges pour remplacer celle qui se perd par évaporation. Nous verrons plus tard que l'air dissous dans l'eau joue un rôle important dans ces piles où il remplace, jusqu'à un certain point les acides, en oxydant les plaques de zinc.

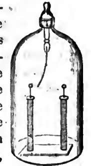
La pile à eau, c'est ainsi que M. Gassiot l'a nommée, ne donne que des effets dynamiques très-faibles comparés aux effets statiques ou de tension. Il en est de même de la pile sèche qui ne manifeste l'électricité qu'à l'état statique. Dans cette pile, dont la première idée appartient à Delas, mais qui, sous sa forme actuelle, est due à Zamboni, le conducteur liquide est remplacé par du papier; circonstance qui l'a fait nommer pile sèche; cependant ce nom lui a été improprement donné, car elle ne fonctionne que parce que le papier, substance hygrométrique, est toujours plus ou moins humide; elle ne marcherait pas s'il était absolument sec. Le zinc est remplacé dans

cette pile par de l'étain, et le cuivre par du peroxyde de manganèse. On la construit en prenant du papier étamé d'un seul côté; sur la surface du papier non étamée on étend, avec un pinceau, une couche de peroxyde de manganèse en poudre, dont on fait une pâte aussi fluide que possible en la dissolvant avec du lait, et qu'on fait tenir au moyen d'un peu de gélatine ou d'amidon. Quand cette couche est bien sèche, on découpe en disques égaux, au moyen d'un emporte-pièces, les feuilles de papier ainsi recouvertes. Puis on place tous ces disques les uns au-dessus des autres, en ayant soin de les mettre tous dans le même ordre, de façon qu'on ait toujours étain et peroxyde de manganèse en contact, puis papier et de nouveau étain et peroxyde de manganèse, et ainsi de suite. On en entasse de cette façon plusieurs milliers et on construit ainsi une colonne, soit pile semblable pour la forme à la première pile de Volta, et dont l'une des extrémités est négative et l'autre positive. La pile se termine nécessairement à ses deux extrémités par une surface métallique isolée, à l'une, l'extrémité négative, par la couche d'étain, à l'autre, l'extrémité positive, par celle de peroxyde de manganèse.

La pile sèche ne peut, en général, développer aucun courant électrique quand on réunit ses pôles par un corps conducteur; elle ne peut produire qu'une série de petites étincelles provenant de la réunion des deux électricités qui s'accumulent lentement à chacune de ses extrémités. Cependant en donnant une grande surface aux disques et en n'en mettant qu'un nombre limité, M. Delezenne a obtenu, avec ces piles, quelques effets de courant, tels en particulier que la décomposition de l'eau; il employait une pile de 300 couples de 270 centimètres carrés de surface chacun.

Le principal usage qu'on fasse des piles sèches, c'est de les appliquer à la construction d'un électroscope qui est de tous le plus sensible, et qui a de plus sur les autres l'avantage d'indiquer la nature de l'électricité en même temps que sa présence. Cet électroscope, dit de Bohnenberg, du nom de son inventeur (fig. 36), consiste en deux piles sèches placées verticalement sur un pied en bois, à une distance de 10 à 12 centimètres l'une

de l'autre; chacune des piles se termine supérieurement par une boule de métal d'un diamètre égal ou supérieur à celui des disques dont elles sont formées. Cette boule se charge de l'électricité accumulée au pôle de la pile au-dessus de laquelle elle est placée; on dispose les piles de façon que les pôles supérieurs soient, pour l'une le positif, pour l'autre le négatif. On recouvre les deux piles d'une cloche en verre, percée d'un trou dans sa partie supérieure. On introduit, par cette tubulure, une tige en métal, portant une seule feuille d'or battu, dont l'extrémité inférieure doit pouvoir osciller entre les deux boules positive et négative des piles sèches. Les précautions pour isoler la tige de métal qui porte la feuille d'or et les autres parties de l'appareil sont, du reste, les mêmes que pour les autres électroscopes. Dès que, par l'approche d'une source d'électricité, la feuille d'or est électrisée, elle se porte vers l'une ou l'autre des deux boules suivant la nature de l'électricité dont elle est chargée, vers la boule négative, si l'électricité qu'elle possède est positive et réciproquement. On a donc immédiatement perception à la fois de la présence de l'électricité et de sa nature.


Fig. 36.

L'instrument est si sensible, qu'il est affecté à la distance de plus d'un mètre par l'électricité d'un bâton de verre ou d'un bâton de cire; il risque même quelquefois, si l'on n'y prend pas garde, de donner de fausses indications par l'excès même de sa sensibilité. En effet, si les deux piles sèches sont trop rapprochées, et si la feuille d'or n'est pas exactement entre les deux boules, il suffit du plus léger mouvement qui la porte plus près de l'une des deux, pour qu'elle soit attirée par cette boule, lors même qu'elle n'est pas électrisée, comme le serait tout corps léger. On pourrait donc facilement être induit en erreur et croire à la présence d'une électricité qui n'existe pas, si l'on ne prenait les plus grandes précautions. On a réussi même à obtenir ainsi un mouvement continu; car une fois en mouvement, la feuille d'or ou tout autre corps ayant touché l'une des boules, se charge de son électricité, puis en est repoussée pour

être attirée par l'autre qu'elle vient toucher et dont elle prend l'électricité; puis elle en est repoussée et retourne à la première, et ainsi de suite. Pour obtenir ce mouvement oscillatoire continu, il vaut mieux employer un corps léger, tel qu'une petite boule ou un disque en clinquant, suspendu à un fil de cocon; la feuille d'or risque de rester quelquefois adhérente à la boule avec laquelle elle vient en contact, malgré la force répulsive de son électricité et de celle de la boule qui n'est pas suffisante pour vaincre cette adhésion.

L'espérance qu'on avait fondée sur les piles sèches, imaginées d'abord par Deluc, en 1810, puis perfectionnées par Zamboni, qui a donné son nom à celle que nous venons de décrire, ne se sont point réalisées. Non-seulement elles sont très-bornées dans leur application, puisqu'elles ne donnent naissance qu'à de l'électricité statique, sauf le cas exceptionnel et difficile à réaliser, que nous avons cité où elles produisent un courant à peine sensible; mais de plus, elles n'ont pas même l'avantage d'être d'une durée bien longue. Au bout de quelques années, elles ne marchent plus, et il faut les remplacer par d'autres dans les appareils, dans la construction desquels on les fait entrer. Ce défaut de durée tient, comme nous le verrons en nous occupant de la théorie générale des piles voltaïques, à ce que le papier finit par perdre, en partie, sa faculté hygrométrique, et surtout à ce que l'étain s'oxyde.

SECONDE PARTIE

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

CHAPITRE PREMIER.

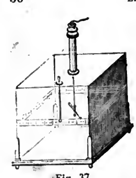
ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES.

§ 1. Balance électrique de Coulomb.

Après avoir exposé les phénomènes généraux que présente l'électricité et nous être familiarisés avec l'étude de cet agent, examinons de plus près ses propriétés en commençant par celles qui se rapportent à l'électricité statique.

Occupons-nous d'abord des répulsions et des attractions que manifestent les corps électrisés. Il est facile de s'apercevoir, au moyen des appareils dont nous avons fait usage pour démontrer l'existence de ces répulsions et de ces attractions, que l'énergie avec laquelle elles ont lieu est d'autant plus grande, que les deux corps entre lesquels elles s'exercent sont plus rapprochés. Ainsi, dans le cas de l'attraction, on voit d'abord les deux boules électrisées se rapprocher lentement, puis prendre un mouvement plus rapide, et enfin se précipiter l'une sur l'autre. Il en est de même pour la répulsion ; on voit les deux boules, quand elles sont chargées de la même électricité, se fuir avec d'autant plus de vivacité qu'on tend davantage à les rapprocher l'une de l'autre.

Pour déterminer la loi à laquelle est soumise cette influence de la distance, il faut faire usage d'un instrument imaginé par Coulomb, qu'il est nécessaire aussi de connaître, pour pouvoir découvrir les autres lois auxquelles est soumise l'électricité sta-


Fig. 37.

tique. Cet instrument est la balance électrique, soit balance de torsion (fig. 37). Elle consiste en une cage de verre cylindrique ou cubique, surmontée dans sa partie supérieure d'un tube vertical de 40 à 50 centimètres de hauteur; la cage elle-même peut avoir 30 à 40 centimètres de diamètre et même davantage. Le haut du tube est fermé par une pièce en laiton qui, semblable au couvercle d'une tabatière, peut tourner à frottement juste autour de l'ajustage, également en laiton, qui est fixé au tube lui-même. Une division circulaire permet de mesurer de combien de degrés on fait tourner la pièce mobile qui peut ainsi décrire plusieurs circonférences de cercle. Cette pièce porte intérieurement une pince métallique verticale adaptée exactement à son centre et à laquelle est fixé, par une de ses extrémités, un fil très-fin d'argent ou de platine qui est tendu à son autre extrémité par un poids en laiton. Le fil doit être assez long pour que son extrémité inférieure aboutisse environ à la moitié de la hauteur de la cage de verre; il est en général de 60 centimètres environ. Le poids de laiton qui tend le fil est traversé par une aiguille horizontale en verre ou en gomme laque, dont l'une des branches est très-courte et dont l'autre de 8 à 12 centimètres de longueur, suivant la grandeur de la cage, porte à son extrémité une petite boule de moelle de sureau doré ou un petit disque métallique de clinquant. Une division circulaire tracée autour de la cage de verre sert à mesure les espaces angulaires que parcourt cette aiguille. La déviation qu'elle affecte quand elle n'est sollicitée par aucune force dépend de la position qu'on donne au couvercle mobile qui porte le fil auquel elle est suspendue. On a soin que le 0° de la division tracée sur la cage se trouve coïncider avec la direction qu'affecte l'aiguille, quand le couvercle lui-même est au 0° de la division tracée sur sa propre circonférence. De cette manière, les points de départ ou les 0° des deux divisions correspondent. Enfin on introduit verticalement

par une ouverture faite dans le couvercle de la cage une tige isolante en verre ou en gomme laque portant une balle ou un disque parfaitement semblable à la balle ou au disque qui sont à l'extrémité de l'aiguille mobile ; on combine le lieu de l'ouverture de la cage et la longueur de la tige, de façon que la balle ou le disque qui sont à son extrémité soient en contact avec la balle ou le disque de l'aiguille, lorsque l'aiguille elle-même est dans la direction qui correspond au 0° de la division.

La tige isolante peut être enlevée et remise facilement en place au moyen de la pièce à laquelle elle est fixée par son extrémité supérieure, et qui sert en même temps à l'assujettir dans l'ouverture pratiquée au couvercle de la cage de verre.

§ 2. Détermination de la loi que suivent, avec la distance, les attractions et les répulsions électriques.

On commence, pour faire l'expérience, par enlever la tige isolante, puis on donne à la balle qui la termine de l'électricité vitrée ou résineuse en la touchant avec un corps électrisé. On la remet immédiatement en place ; elle partage aussitôt son électricité avec la balle de l'aiguille mobile. Celle-ci est alors repoussée, et l'aiguille décrit un arc de cercle plus ou moins grand, suivant l'énergie de la répulsion. Après quelques oscillations, elle se fixe dans une certaine position, à 36° par exemple du point de départ, c'est-à-dire du 0° de la division. Si l'aiguille s'arrête à cette distance et ne décrit pas un arc plus grand, c'est que, à 36° de distance, il y a équilibre entre les deux forces, la force répulsive qui existe entre la balle électrisée fixe et la balle électrisée mobile, et la force de torsion du fil métallique auquel l'aiguille est suspendue et qui tend à la ramener à son point de départ. Puisque l'aiguille prend une position fixe après avoir décrit un arc de 36°, cela prouve que la force avec laquelle le fil tordu d'un angle de 36° tend à se détordre est précisément égale à celle avec laquelle les deux balles se repoussent à la distance de 36°.

Cherchons maintenant quelle serait la force qui ferait équi-

libre, et par conséquent serait égale à celle avec laquelle elles se repousseraient si elles étaient à une plus petite distance, à 18°, par exemple, au lieu de 36°, c'est-à-dire à une distance moitié moindre. Pour cela, tournons le couvercle métallique auquel est fixée l'extrémité supérieure du fil qui porte l'aiguille, de manière à obliger cette aiguille de se rapprocher de son point de départ, d'obliger, par conséquent, la balle mobile de se rapprocher de la fixe. Nous verrons que, pour qu'il n'y ait plus qu'un arc de 18° entre les deux balles, il faut tourner en haut le couvercle de 126°, ce qui fait que le fil a été tordu par en haut de 126°; mais puisque l'aiguille n'est pas au 0° de sa division, mais qu'elle reste fixée à 18° au delà, il en résulte que le fil est tordu en bas de 18° et en haut de 126°, ce qui fait en tout une torsion de 144°. La force donc qui fait équilibre ou qui est égale à celle avec laquelle les deux balles se repoussent quand elles sont à 18° de distance, est la force avec laquelle un fil tordu de 144° tend à se détordre. On opérerait de même pour déterminer la force avec laquelle les deux balles se repoussent quand l'arc qui les sépare ne serait plus que de 9°. On trouverait qu'il faut tordre le fil par le haut de 567°, ce qui fait 576° de torsion en tout, en ajoutant les 9° dont il est tordu par le bas, puisque l'aiguille est maintenue à 9° au delà de son 0° de torsion. Ainsi la force avec laquelle les deux balles se repoussent quand elles ne sont plus qu'à 9° de distance l'une de l'autre, est représentée par une torsion de 576°.

L'expérience avait prouvé à Coulomb que les forces de torsion sont proportionnelles aux angles de torsion, en d'autres termes, que la force qu'il faut employer pour tordre un fil d'un certain angle, ou celle avec laquelle il tend à se détordre, est proportionnelle à cet angle; c'est-à-dire que si l'angle devient double, triple, moitié, un quart, la force devient également double, triple, moitié, un quart de ce qu'elle était. Ainsi les forces qui font équilibre ou qui sont égales aux forces avec lesquelles les balles électrisées se repoussent aux distances 36°, 18°, 9°, sont entre elles comme les angles de torsion 36°, 144°, 576°. Mais ces angles sont eux-mêmes entre eux comme 1 : 4 : 16; d'où l'on peut conclure que si les distances sont entre elles

comme 1 : 1/2 : 1/4; les forces répulsives sont entre elles comme 1 : 4 : 16. Il est donc exact de dire que *la force avec laquelle deux corps électrisés se repoussent est inversément proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.*

On prouve de la même manière que *la force avec laquelle deux corps qui ont des électricités différentes s'attirent est inversément proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.* Dans ce cas, il faut, après avoir donné à la balle de l'aiguille mobile au moyen de l'autre balle une certaine électricité, enlever cette dernière, et lui donner l'électricité contraire. Mais avant de remettre en place la balle qui est destinée à rester toujours fixe au 0° de la division, il est nécessaire de donner à l'aiguille mobile une autre position qui empêche que le contact n'ait lieu immédiatement entre la balle qui la termine et la balle fixe qui a une électricité contraire; car, sans cela, ces deux balles se touchant, les deux électricités se neutraliseraient immédiatement et aucun effet n'aurait plus lieu. Dans ce but on tourne le couvercle métallique auquel est fixé le fil de torsion, et, de cette manière, on amène l'aiguille mobile à se tenir quand elle n'est sollicitée par aucune force, et que le fil est, par conséquent, sans torsion à 40° ou 50° du 0° de sa division. C'est alors qu'on introduit la balle qui doit rester fixe au 0° et qui est chargée d'une électricité contraire à celle qui a été donnée déjà à la balle mobile avant qu'on lui fit changer de place. Il y a aussitôt attraction entre ces deux balles, mais elles sont empêchées de venir en contact par l'effet de la torsion du fil qui résulte du déplacement de la balle mobile. Elles se maintiennent donc à une certaine distance l'une de l'autre, distance à laquelle il y a équilibre entre la force de torsion qui tend à les séparer et l'attraction qui règne entre elles et qui tend à les rapprocher.

On augmente ou on diminue la tension de manière à maintenir l'équilibre à d'autres distances. On a ainsi des distances variables entre les balles et des angles de torsion correspondants à ces distances, et c'est des rapports qui règnent, d'une part entre ces distances, d'autre part entre ces angles, qu'on tire, comme pour le cas de la répulsion, la loi que nous avons

énoncée. Il faut seulement prendre garde qu'en faisant varier les torsions on n'amène pas les deux balles à une distance l'une de l'autre assez faible pour que l'attraction l'emportant sur la force de torsion, elles viennent subitement en contact, auquel cas les deux extrémités s'étant neutralisées, tout serait à recommencer[1]. Dans toutes les expériences qui précèdent, l'électricité que possèdent les balles risque de se dissiper plus ou moins vite par l'effet de l'imparfait isolement des supports et de l'humidité de l'air. Il faut, pour éviter cet inconvénient, dessécher, autant que possible, l'intérieur de la balance de torsion en y plaçant du chlorure de calcium ou d'autres corps qui absorbent l'humidité, faire les expériences aussi vite que possible, et chercher enfin à tenir compte de la déperdition de l'électricité, en prenant la moyenne entre les résultats des mêmes expériences faites à des époques un peu différentes[2].

§ 3. Influence de la quantité absolue d'électricité sur les attractions et les répulsions.

Après avoir trouvé les lois qui lient les attractions et les répulsions électriques avec la distance mutuelle des deux corps électrisés, il restait à déterminer la loi suivant laquelle la force attractive ou répulsive dépend des quantités d'électricité accumulées sur chaque corps. Pour y parvenir, Coulomb est parti du principe évident par lui-même que si deux corps, par exemple deux sphères conductrices isolées, de même grandeur et parfaitement semblables en tout point, sont mises en contact, elles se partagent également les électricités qu'elles possèdent. De telle sorte que si l'une des sphères isolées est électrisée et

[1] Voir pour les calculs la note A.

[2] Coulomb a confirmé les lois qu'il avait trouvées par la balance de torsion par une méthode toute différente, qui consiste à faire osciller devant un globe isolé et électrisé une aiguille horizontale terminée par une petite boule chargée de la même électricité que le globe ou d'une électricité différente. On compte le nombre des oscillations dans un temps donné à différentes distances, et on en déduit, par la formule du pendule, l'influence de la distance sur l'intensité de la force.

Nous développerons plus en détail cette méthode à l'occasion des attractions et des répulsions magnétiques.

que l'autre ne le soit pas, elles ont après le contact la même quantité d'électricité chacune, savoir : la moitié de ce qu'avait celle qui seule était électrisée. Ce point étant admis, on observe la force de torsion qui, à une certaine distance, fait équilibre à la force répulsive ou attractive des deux balles de la balance qui sont semblables et chargées de la même quantité d'électricité. On a une troisième balle parfaitement semblable aux deux autres, isolée comme elles, mais non électrisée. On touche avec cette balle la balle fixe de la balance ; ce contact lui enlève la moitié de son électricité, d'après le principe que nous venons de poser, la balle mobile gardant la totalité de la sienne. On cherche alors de nouveau la force de torsion nécessaire pour faire à la même distance équilibre à la force attractive ou répulsive des deux balles de la balance, et on trouve que cette force n'est plus que la moitié de ce qu'elle était précédemment. En réduisant ensuite également à la moitié par le même procédé l'électricité de la balle mobile, on trouve que la force de torsion n'est plus que le quart de ce qu'elle était dans l'origine. Il en est de même si, sans rien changer à l'état électrique de la balle mobile, on diminue encore une seconde fois de moitié l'électricité de la balle fixe, c'est-à-dire si on la réduit au quart de ce qu'elle était primitivement. Ces expériences prouvent donc que, *la distance restant la même, les attractions et les répulsions sont en raison composée des quantités d'électricité dont les deux corps sont chargés* ; ou, ce qui revient au même, que *la force attractive ou répulsive est le produit de ces deux quantités.*

Il est facile, en effet, de voir qu'il n'y a qu'un produit qui puisse devenir moitié moindre lorsque l'un des facteurs diminue de moitié, devenir quatre fois moindre lorsque les deux facteurs diminuent chacun de moitié ou qu'un des deux seulement devient le quart de ce qu'il était, l'autre ne changeant pas. Ce résultat a été vérifié par Coulomb au moyen d'un grand nombre d'expériences qui ont été faites avec des quantités absolues d'électricité très-différentes les unes des autres.

La loi que nous venons d'établir, réunie à celle qui régit la distance, permet de donner à l'expression de la force attractive et répulsive qui règne entre deux corps électrisés cette forme

très-simple $F = \frac{E E}{D^2}$, en appelant F la force, E et E' les quantités d'électricité dont les deux corps sont chargés, et D la distance qui règne entre eux.

§ 4. Électromètres de torsion.

La connaissance des deux lois auxquelles sont soumises les attractions et les répulsions électriques a fourni aux physiciens un excellent électromètre dans la balance de torsion. Pour l'appliquer à cet usage on fait communiquer la balle fixe au moyen d'une tige métallique logée dans l'axe du tube isolant qui la porte, avec une petite sphère métallique située extérieurement, à la cage de verre qui renferme tout l'appareil. Cette sphère est mise en communication comme pour les électroscopes ordinaires avec la source d'électricité. L'électricité arrive à la balle fixe et à la mobile qui est en contact avec elle au 0° de torsion, et les charge également. Il y a immédiatement répulsion entre les deux balles ; au moyen de la torsion on les ramène à une distance déterminée, toujours la même pour des expériences comparatives. Les angles de torsion nécessaires pour ramener les balles à la distance constante, représentent dans chaque expérience les forces répulsives qui sont proportionnelles. Mais ces forces étant le produit des deux quantités égales d'électricité dont les balles sont chargées, il est clair que chacune de ces quantités elles-mêmes est proportionnelle aux racines carrées des forces répulsives ou des angles de torsion correspondants. On a en effet dans ce cas $F = \frac{E^2}{D^2}$ et dans l'autre $F' = \frac{E'^2}{D^2}$ d'où $E : E' = \sqrt{F} : \sqrt{F'}$. Ainsi si l'angle est quatre fois plus grand dans une expérience que dans l'autre, cela signifie que la quantité d'électricité que possède chacune des balles, et par conséquent celle de la source qui a été mise en communication avec elles, est deux fois plus grande. Il faut avoir soin, après chaque expérience et avant d'en recommencer une autre, de décharger les deux balles de la balance en les mettant en communication avec le sol au moyen d'une tige métallique que l'on tient à la

main. Sans cette précaution, l'électricité qui serait restée après une expérience compliquerait et rendrait fautifs les résultats de la suivante. On peut, il est vrai, ne pas décharger la balle mobile et lui laisser une quantité constante d'électricité, en ayant soin d'éviter qu'elle ne vienne en contact avec la balle fixe. Alors cette dernière seule est mise en communication avec la source et les angles de torsion où les forces répulsives sont alors simplement proportionnelles aux quantités d'électricité dont elle se charge, quantités qui ne sont variables que pour elle. Ce mode d'opérer est plus facile et il n'exige aucun calcul; aussi est-il plus usité, quoiqu'il soit moins sûr, à cause de la perte d'électricité qu'éprouve toujours plus ou moins la balle mobile pendant la durée des expériences, malgré le soin qu'on a de prendre les précautions que nous avons déjà indiquées à l'occasion de la balance de torsion.

La balance électrique de Coulomb, employée comme électromètre, n'indique pas, il est vrai, immédiatement la nature de l'électricité; détermination qu'on peut obtenir du reste facilement par les mêmes moyens qu'on emploie pour les autres électroscopes. Mais la grande supériorité de cet instrument, c'est qu'il peut seul donner une mesure exacte des forces électriques, et qu'il est susceptible en outre d'une grande sensibilité. Pour augmenter, lorsque c'est nécessaire, cette sensibilité, il faut que le fil métallique dont la torsion doit mesurer les forces soit aussi fin que possible et aussi long que le permet la construction de l'appareil. On a soin en même temps que l'aiguille en verre ou en gomme laque qui porte la balle mobile soit, ainsi que cette balle elle-même, d'une grande légèreté. On finit par avoir ainsi un appareil d'une délicatesse remarquable. Il peut même devenir, de tous les électroscopes, le plus délicat, sauf peut-être celui à piles sèches, si on remplace le fil métallique qui porte l'aiguille mobile par un fil de cocon dédoublé; on lui donne alors une forme légèrement différente et plus simple (fig. 38). Mais le fil de soie écrue n'obéissant pas aux lois de la torsion, comme les fils de métal, l'appareil n'est plus un électromètre, il devient un simple

Fig. 38.

électroscope. Il suffit, dans ce cas, d'une force égale à 1/60,000 de grain pour faire parcourir à l'aiguille une circonférence tout entière; par conséquent un arc d'un degré parcouru par cette aiguille correspond à une force équivalente seulement à 1/21,600,000 de grain. On voit par cet exemple quelle force minime on peut parvenir à mesurer et par conséquent jusqu'à quel point on peut réussir à découvrir les plus légères traces d'électricité.

§ 5. Objections à la généralité des lois précédentes.

Avant de terminer ce chapitre, nous devons ajouter que la généralité des deux lois trouvées par Coulomb a été contestée par un physicien anglais, M. Harris. Ce savant a fait un grand nombre d'observations au moyen d'un appareil de son invention nommée *balance bifile*, dans lequel l'aiguille mobile est portée par deux fils en soie écrus dont les points d'attache, très-rapprochés l'un de l'autre, sont à égale distance de son centre de gravité. Dès que l'aiguille mobile est chassée de sa position d'équilibre, les deux fils ne peuvent plus garder leur position verticale et s'inclinent en sens opposé plus ou moins, suivant l'intensité de la force qui chasse l'aiguille; il en résulte nécessairement que celle-ci s'élève. La position nouvelle qu'elle prend est donc celle où il y a équilibre entre la force électrique et la force avec laquelle la pesanteur tend à la ramener à sa position normale, force qu'il est facile de calculer. La pesanteur remplace dans la balance bifile de M. Harris la force de torsion de la balance de Coulomb. Quant à la légère torsion que peuvent éprouver les fils de soie, il n'est pas nécessaire d'y avoir égard, l'expérience ayant prouvé que son effet est complétement nul. Le même physicien s'est aussi servi d'une simple balance très-délicate dans laquelle, au moyen de poids placés dans l'un des bassins, il faisait équilibre aux attractions électriques agissant sur un disque fixé à l'autre bassin.

C'est avec ces appareils et en variant beaucoup ses expériences que M. Harris a trouvé que la loi de l'inverse du carré de la distance ne se soutient exactement que lorsque les balles ou

les disques sont chargés d'une égale quantité d'électricité, lorsque cette quantité n'est pas trop faible et lorsque enfin la distance angulaire qui les sépare est supérieure à 9°. Autrement, et surtout si les charges électriques des deux corps sont très-différentes, la force devient inverse de la simple distance entre certaines limites. Les mêmes causes modifient également la seconde loi qui établit le rapport qui existe entre les quantités d'électricité et les forces répulsives ou attractives. Ainsi, dans une expérience, les quantités respectives d'électricité étant successivement sur chacun des deux disques à la fois 1 et 2, les forces répulsives correspondantes au lieu d'être 1 et 4 ont été 1 et 5. Cet écart de la loi tenait à l'intensité absolue trop faible de l'électricité. Mais il est encore bien plus sensible quand il y a inégalité dans les charges électriques des deux corps et que cette inégalité est très-grande.

Ces exceptions aux lois de Coulomb ne sont qu'apparentes; elles tiennent à ce qu'il se passe chez des corps électrisés qui sont en présence des modifications importantes dans leur état électrique, par l'effet d'influences dont nous étudierons l'action plus loin; influences qui sont d'autant plus sensibles que les charges électriques sont plus différentes. Elles tiennent aussi à ce que très-probablement les lois dont il s'agit ne sont générales que pour des points presque mathématiques et non pour des corps de formes et de dimensions quelconques. Or, on conçoit qu'elles doivent l'être quand on emploie, comme Coulomb l'a fait, de petites sphères égales pour corps électrisés; car, ainsi qu'on le démontre en mécanique, l'action d'une sphère est toujours la même que celle qu'exercerait son centre en supposant que toutes les forces dont la sphère est douée fussent concentrées à ce centre. Nous croyons donc qu'on peut considérer comme générales les lois de Coulomb et que, dans les cas où elles semblent ne pas l'être, elles peuvent être regardées comme s'éloignant d'autant moins de la vérité, que les corps ont de plus petites dimensions et que leurs formes se rapprochent plus de la forme sphérique.

M. Harris a encore trouvé que lorsqu'une quantité d'électricité est constante, la force attractive est inverse du carré des

surfaces sur lesquelles l'électricité est répartie, et que quand ce sont les surfaces qui sont constantes, la force est proportionnelle aux carrés des quantités d'électricité. Ce qu'il y a d'assez remarquable, c'est que la distance à laquelle une décharge entre deux balles chargées d'électricités contraires peut avoir lieu, est simplement proportionnelle aux quantités d'électricité, tandis que les forces attractives sont proportionnelles aux carrés de ces forces.

Le même physicien a aussi constaté que la force attractive entre deux corps électrisés ne dépend que de la forme des deux surfaces opposées et nullement de celle du reste du corps; ainsi deux cones opposés par leur base s'attirent comme deux disques circulaires égaux à ces bases, deux hémisphères comme deux sphères du même diamètre; l'attraction entre deux surfaces circulaires l'une plus grande que l'autre est la même qu'entre deux surfaces égales à la plus petite des deux; elle est encore la même entre un anneau et un disque qu'entre deux anneaux de même diamètre. Ces résultats peuvent se résumer en la loi suivante: c'est que l'attraction est directement proportionnelle au nombre des points qui sont immédiatement opposés les uns aux autres, et inverse du carré de leurs distances respectives.

Nous ne terminerons pas ce chapitre sans ajouter que M. Marié Davy vient de confirmer, par de nouvelles expériences faites avec beaucoup de soin, l'exactitude de la loi de Coulomb constatée par M. Harris; seulement il a démontré que, pour qu'elle soit rigoureusement vraie pour deux sphères, il faut que les distances de ces sphères dépassent neuf ou dix fois leur rayon, ce qui montre que pour des points physiques dont l'étendue est très-petite, on a, à toutes les distances, la loi de l'inverse du carré, que par conséquent cette loi est bien la loi élémentaire des attractions et des répulsions électriques; ce que confirment d'ailleurs indirectement tous les résultats obtenus par M. Marié Davy.

CHAPITRE II.

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA SURFACE DES CORPS CONDUCTEURS ISOLÉS.

§ 1. Tendance de l'électricité à se porter à la surface des corps conducteurs isolés.

Ce qui caractérise un corps conducteur, c'est la facilité avec laquelle l'électricité s'y propage. Dès qu'on touche un point quelconque d'un conducteur isolé avec un corps électrisé, aussitôt tous les points du conducteur sont eux-mêmes électrisés, et dès qu'on fait communiquer avec le sol, en le touchant avec la main ou de toute autre manière, un point d'un conducteur isolé et électrisé, aussitôt ce point et tous les autres n'ont plus d'électricité. Mais cette électricité, qui se répand ainsi sur tous les points de la surface du conducteur isolé, ne pénètre point dans l'intérieur, et sa diffusion ne dépend que de la surface du corps. C'est ce qu'avait prouvé Coulomb par une suite d'expériences dans lesquelles il observait la force répulsive entre les deux balles de la balance de torsion, avant et après avoir touché la balle fixe avec une troisième balle isolée et non électrisée et de même grandeur exactement. Que cette dernière fût pleine ou vide, de cuivre, de plomb, ou d'un métal quelconque, de bois, de liége ou de moelle de sureau, elle enlevait toujours à celle avec laquelle elle était mise en contact la même quantité d'électricité, c'est-à-dire la moitié de ce qu'elle possédait; et la preuve, c'est que la force répulsive était réduite à la moitié de ce qu'elle était auparavant. Ainsi donc, dans le contact de deux sphères isolées, l'électricité se partage également entre elles pourvu qu'elles soient faites toutes deux d'une matière conductrice, quelle que soit d'ailleurs leur densité qu'elles soient pleines ou creuses. C'est une preuve que l'électricité ne se porte qu'à la surface des corps, car si elle se portait aussi dans les

particules intérieures, la balle pleine devrait en prendre plus que la creuse, et si elle se portait dans une plus grande proportion dans les particules d'une espèce que dans celles d'une autre, la balle de métal ne devrait pas prendre la même quantité d'électricité que celle de moelle de sureau.

Si, au lieu de toucher la balle fixe de la balance avec une sphère de même surface, on la touche avec une sphère d'une surface double, on réduit son électricité au tiers de ce qu'elle était primitivement, ainsi que le prouve la diminution de la force répulsive. Cette expérience est une nouvelle preuve que la charge électrique se porte toute à la surface dans les corps conducteurs isolés, car la petite balle n'a perdu les deux tiers de son électricité que parce qu'elle a été en contact avec un globe d'une surface double de la sienne et que la totalité de son électricité s'est répartie entre les deux sphères d'inégales grandeurs proportionnellement à leurs surfaces respectives.

Une expérience encore plus directe démontre cette tendance de l'électricité à se porter aux surfaces. Une sphère métallique isolée est électrisée; on l'enveloppe de deux hémisphères métalliques creux (fig. 39), qui la recouvrent exactement de ma-



Fig. 39.

nière à devenir sa véritable surface. Ces hémisphères sont fixés à des manches isolants au moyen desquels on les tient. Après en avoir enveloppé la sphère électrisée on les enlève; on ne trouve plus alors la moindre trace d'électricité sur la sphère, comme on peut en avoir la preuve en la touchant avec un électroscope sensible. Par contre, les hémisphères sont électrisés quoiqu'ils ne le fussent point avant l'expérience; ils ont donc pris à la sphère toute l'électricité qu'elle possédait. Enlever les hémisphères c'est enlever la surface de la sphère, et puisqu'en enle-

vant les hémisphères on enlève toute l'électricité, on a la preuve que c'est bien à la surface que toute la charge électrique s'est portée.

Pour démontrer ce principe important d'une manière plus générale et plus complète, on se sert d'un petit appareil nommé *plan d'épreuve*. Il consiste en un petit disque de clinquant ou de papier doré fixé à l'extrémité d'un fil isolant de gomme laque ou de verre. La longueur de cette tige et le support qui la porte sont calculés de façon que le petit disque puisse remplacer, dans la balance de torsion, la balle fixe de l'appareil et agir comme elle, lorsqu'il est électrisé, sur le disque ou la balle fixée à l'extrémité de l'aiguille mobile. On touche avec le plan d'épreuve un point de la surface d'un corps; et si ce point est électrisé, on s'en aperçoit immédiatement, parce que le plan d'épreuve porté à la balance agit sur l'aiguille mobile. On constate, par cette manière d'opérer, que quelque mince que soit son enveloppe, une sphère métallique creuse ne présente pas la plus légère trace d'électricité sur sa surface intérieure, lors même que sa surface extérieure est fortement électrisée. On introduit également le plan d'épreuve dans un cylindre ou un corps creux de forme quelconque, de manière qu'il en touche la surface intérieure; il en ressort, sans trace d'électricité, tandis que, s'il est mis en contact avec la surface extérieure, il prend une charge électrique bien prononcée.

Voici encore quelques expériences de Faraday qui démontrent d'une manière élégante le même principe. Un cylindre fait avec une gaze métallique ou d'un treillis de fil de fer à mailles très-peu serrées est placé sur un disque métallique horizontal qui repose sur un support isolant; on lui communique de l'électricité par sa surface intérieure; le plan d'épreuve indique que la surface extérieure est seule électrisée, malgré la facilité avec laquelle les deux surfaces peuvent communiquer l'une avec l'autre. Un animal tel qu'une souris, placé intérieurement, n'éprouve aucune commotion, lors même qu'on électrise très-fortement l'appareil tout entier et qu'on en tire de vives étincelles[1].

[1] M. Faraday recouvre dans ses cours ses électroscopes à feuilles d'or les plus

Un cylindre métallique creux est placé sur un disque métallique isolé, d'un diamètre un peu plus grand que le sien; il est électrisé, et sa surface extérieure seule donne des signes d'électricité. On l'entoure extérieurement de petites colonnes en laiton, plus hautes que lui et qui reposent, par leur base, sur le même disque métallique; toute l'électricité se porte aussitôt sur la surface extérieure de ces petites colonnes. Une troisième expérience consiste à fixer à un fil de métal isolé et tourné en forme de cercle un sac de mousseline conique, ce qui fait une coiffe à papillons.


Fig. 40.

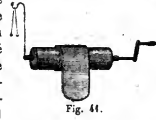
On l'électrise; on ne trouve avec le plan d'épreuve l'électricité que sur la surface extérieure. Au moyen de deux fils isolants de soie fixés au sommet du cône, l'un en dedans, l'autre en dehors, on retourne le sac sans lui faire perdre l'électricité dont il est chargé, de manière que la surface qui était extérieure devienne intérieure, et réciproquement; et c'est toujours la surface qui est en dehors qui se trouve seule chargée d'électricité (fig. 40).

§ 2. Réaction électrique des points d'une surface.

Il est donc bien prouvé que c'est à la surface extérieure d'un corps conducteur que se porte toute l'électricité dont il est chargé. Chaque point de cette surface aura une certaine quantité d'électricité, ce qu'on nomme une certaine *réaction électrique*, expression par laquelle on désigne l'état d'un point ou d'une surface électrisée, qui dans l'état statique n'exerce point d'action, mais serait virtuellement capable d'en exercer une. La réaction électrique de chaque point de la surface d'un corps conducteur doit dépendre, pour une même quantité d'électri-

sensibles de filets de coton ou de lin, à mailles très-lâches, pour les mettre à l'abri de l'influence de l'électricité ambiante. Malgré le voisinage de puissantes machines électriques en activité, les électroscopes n'éprouvent aucun effet, l'électricité qui leur arrive se portant en entier sur la surface extérieure du tissu qui les enveloppe.

cité donnée à ce corps, de l'étendue de sa surface et lui être inverse, puisque toute l'électricité se porte uniquement à la surface. On peut prouver directement par l'expérience ce principe évident de lui-même, au moyen d'un ruban métallique qui est enroulé autour d'un axe métallique isolé. Un électroscope composé de deux balles de moelle de sureau suspendues à des fils de lin est fixé à l'extrémité de l'axe métallique (fig. 41). On électrise le tout, l'électroscope diverge fortement. On déroule le ruban au moyen d'un fil de soie isolant fixé à son extrémité libre; les balles de l'électroscope se rapprochent et viennent presque en contact. On enroule de nouveau le ruban au moyen d'une manivelle isolante fixée à l'extrémité de l'axe; aussitôt les balles de l'électroscope recommencent à diverger. Cette double opération, qu'on peut répéter plusieurs fois sans que l'électricité se dissipe, si l'air est bien sec et les supports bien isolants, montre que la réaction électrique du point de la surface auquel est fixé l'électroscope est d'autant moindre, que la surface totale est plus grande, et réciproquement d'autant plus forte, que la surface est plus petite. La masse du corps reste la même; sa surface seule varie; mais comme l'électricité ne se porte qu'à la surface, il est clair que la même quantité d'électricité, en se répartissant sur une surface plus grande, donne à chacun des points dont elle se compose une réaction électrique moindre que celle que possédaient chacun des points, lorsque la surface était plus petite.


Fig. 41.

§ 3. Distribution de l'électricité sur les points des surfaces de formes différentes.

La réaction électrique d'un point ne dépend pas seulement pour une même surface de l'intensité absolue de l'électricité, mais aussi de la forme générale de la surface à laquelle ce point appartient. L'influence de cette forme sur la manière dont l'é-

lectricité se répartit sur une surface a été l'objet de recherches nombreuses et intéressantes de Coulomb. C'est encore en touchant successivement avec le plan d'épreuve les divers points de la surface d'un corps conducteur électrisé et en le portant chaque fois à la balance de torsion, qu'il est parvenu à déterminer les lois que suit la distribution de l'électricité. En effet, quand le plan d'épreuve est tangent à un point de la surface, il se confond avec le point qu'il touche, il devient lui-même partie de la surface, et prend par conséquent la même charge d'électricité qu'avait l'élément qu'il recouvre. Quand on a enlevé le plan, c'est donc comme si on avait découpé sur la surface un élément de même étendue que lui et qu'on l'eût porté à la balance avec l'électricité qu'il avait quand il faisait partie de la surface. Par conséquent, lorsqu'on veut opérer, on commence par charger le disque de l'aiguille mobile de la même électricité que celle du corps soumis à l'expérience; puis on touche avec le plan d'épreuve un point de la surface du conducteur électrisé, on porte le plan à la balance de torsion; on détermine l'angle de torsion nécessaire pour établir l'équilibre à une distance constante; ensuite on le retire, on le décharge de son électricité; on le porte sur un autre point de la surface du même corps conducteur; il en prend l'électricité, on le porte de nouveau à la balance; on détermine l'angle nécessaire pour établir l'équilibre toujours à la même distance. Le rapport qui existe entre cet angle et le précédent exprime le rapport qui existe entre les deux charges électriques qu'a prises successivement le plan, par conséquent entre les charges électriques des deux portions de la surface qu'on a touchées successivement.

Appliquant cette méthode à déterminer la distribution de l'électricité sur les surfaces des conducteurs isolés de formes diverses, on arrive aux résultats suivants :

Sphère. On trouve que les angles de torsion sont tous égaux, quel que soit le point qu'on touche, d'où l'on conclut que la distribution de l'électricité est uniforme sur une surface sphérique.

Ellipsoïde. Cette uniformité n'existe plus dès que la surface sphérique devient légèrement sphéroïdale; l'expérience donne

des angles de torsion plus grands quand le plan d'épreuve a touché un point de la surface d'un ellipsoïde de révolution voisin des extrémités du grand axe que lorsque le point touché est voisin des extrémités du petit axe. La réaction électrique est la plus grande aux extrémités mêmes du grand axe, la plus petite aux extrémités du petit; et la différence entre les deux réactions est d'autant plus considérable qu'il y a plus de différence entre la longueur des deux axes.

Cylindres. Un cylindre de 5 centimètres de diamètre et de 85 de longueur terminé par deux demi-sphères, touché successivement par le plan d'épreuve au milieu et à l'une de ses extrémités, manifeste des réactions électriques dont la première est à la seconde comme 1 est à 2,30. En comparant le point milieu du cylindre avec un point pris à 25 centimètres de l'extrémité, on trouve que le rapport des réactions électriques est comme 1 à 1,25. Il résulte de là que la réaction électrique varie peu du milieu du cylindre jusqu'à 5 centimètres de ses extrémités et qu'elle croît à partir de cette distance jusqu'à l'extrémité même où elle a son maximum.

Surfaces planes et corps prismatiques. — Des lames minces, dont la longueur est au moins double de la largeur, présentent une réaction électrique à peu près constante du milieu jusqu'à 2 ou 3 centimètres de l'extrémité; cette réaction va en croissant à partir de cette distance jusqu'à l'extrémité même. Aux extrémités de la lame, la réaction est double de ce qu'elle est au milieu, et, si l'on place le plan d'épreuve sur le prolongement de la lame, elle est quadruple. Dans un plateau circulaire, la réaction électrique va en croissant du centre vers les bords; cependant cet accroissement ne devient bien sensible qu'à deux ou trois centimètres du bord; à un centimètre du bord la réaction est double de ce qu'elle est au centre, elle est triple au bord même. L'augmentation de l'électricité vers les extrémités a lieu aussi dans les corps prismatiques, surtout quand ils sont très-allongés. Elle existe également vers leurs arêtes.

Sphères en contact. — Si les sphères sont égales, la distribution de l'électricité ressemble beaucoup à ce qu'elle est sur un

cylindre. Ainsi, dans une série de 24 globes mis en contact sur une même ligne droite, la réaction électrique varie très-peu des globes du milieu à ceux qui précèdent les derniers, mais considérablement des deux extrêmes à ceux qui les suivent immédiatement. Ainsi la réaction électrique du globe extrême est à celle du globe du milieu comme 1,75 : 1,00. Avec deux sphères égales en contact, l'électricité va en croissant à partir du point de contact, où elle est nulle jusqu'aux extrémités du diamètre commun qui passe par ce point, extrémités où elle est à son maximum. Si les sphères en contact vont en diminuant de grandeur à partir d'une extrémité à l'autre, la réaction électrique va en augmentant à partir de la plus grosse jusqu'à la plus petite où elle est la plus considérable.

Pouvoir des pointes. — La réaction électrique est si considérable à l'extrémité d'une pointe que l'électricité s'en échappe pour se porter à travers l'air vers les corps les plus voisins, ou pour se répandre simplement dans l'atmosphère. Cet effet des pointes est une conséquence de la distribution de l'électricité. On a vu, en effet, que dans un ellipsoïde la réaction électrique est plus grande à l'extrémité du grand axe qu'à l'extrémité du petit, et que la différence est d'autant plus considérable que les deux axes diffèrent plus l'un de l'autre. Il en est de même pour un cylindre qui, lorsqu'il est extrêmement long par rapport à son diamètre, présente à ses extrémités une réaction électrique très-grande. Dans ce cas, comme dans celui de l'ellipsoïde très-allongé, cette réaction peut devenir telle que l'électricité s'échappe. C'est exactement ce qui arrive avec une pointe, qu'on peut regarder comme étant l'extrémité ou d'un ellipsoïde ou d'un cylindre très-allongé, ou même d'une série de sphères en contact dont les dimensions vont graduellement en décroissant.

Coulomb a varié considérablement ses expériences sur la distribution de l'électricité dans les corps conducteurs isolés; les résultats remarquables par leur exactitude autant que par leur nombre auquel il est parvenu ont servi plus tard de base aux travaux théoriques qui ont été faits sur ce sujet.

§ 4. Méthodes pour tenir compte de la déperdition de l'électricité.

Les expériences sur la distribution de l'électricité sont sujettes à une source d'erreurs dont il faut savoir tenir compte et qui provient de ce qu'on ne peut toucher en même temps les deux points d'un corps conducteur électrisé dont on veut comparer les réactions électriques; or, pendant le temps qui s'est écoulé entre l'instant où l'on a touché l'un des points et celui où l'on a touché l'autre, une partie de l'électricité dont le corps est chargé s'est écoulée, soit par l'air qui est toujours plus ou moins humide, soit par les supports qui ne sont jamais des isolants parfaits. Il en résulte que l'expérience donne pour le second point touché une réaction électrique relativement plus faible que celle qui devrait être accusée.

Coulomb a cherché à tenir compte de cette cause d'erreur en évaluant d'avance ce que doit être la déperdition. Il a distingué dans ce but la part de la déperdition qui est due à l'air ambiant et celle qui provient de l'imperfection dans la faculté isolante des supports. Quant à l'influence de la première cause, il a trouvé qu'elle dépendait du degré d'humidité de l'air, et il est parvenu à dresser des tables qui donnent pour chaque degré de l'hygromètre la déperdition correspondante de l'électricité, c'est-à-dire le rapport qui existe entre la quantité que le corps perd dans une minute et celle qui lui reste après cette minute. Pour évaluer la part des supports dans la déperdition de l'électricité, il a fait diverses expériences avec des fils de diverses substances, telles que des fils de soie, de verre, de cire et de gomme laque, etc., etc., tous de même diamètre et de longueurs variables. Il a découvert que la faculté isolante de ces fils varie pour chacune avec l'intensité de l'électricité et leur propre longueur, qu'il existe par conséquent un certain degré d'intensité de l'électricité pour lequel ils sont isolants parfaits, mais que ce degré dépend de leur longueur et de leur nature. Ainsi un fil de gomme laque isole une quantité d'électricité dix fois plus forte que celle que peut isoler un fil de soie de même diamètre. Un fil d'une nature quelconque isole une quantité

qui est proportionnelle à la racine carrée de sa longueur.

Ces lois ne sont point générales, car elles ne se vérifient que si les supports sont longs et minces comme des fils; de plus, elles sont souvent altérées par la faculté qu'ont les supports d'une certaine nature, telle que ceux de verre, d'attirer l'humidité de l'air sur leur surface, ce qui détruit, ou du moins diminue notablement leur faculté isolante.

Pour tenir compte de la déperdition de l'électricité, il vaut donc mieux se servir d'une autre méthode, qui est celle que Coulomb a employée de préférence dans ses expériences : c'est la méthode des alternatives ou des moyennes. Voici en quoi elle consiste : on touche d'abord un des points de la surface du corps électrisé avec le plan d'épreuve qu'on porte à la balance de torsion, puis, au bout d'un certain temps, aussi court que possible, on touche un autre point et on opère de même; on touche une seconde fois le premier point au bout d'un temps égal à celui qui s'est écoulé entre les deux premières expériences; on prend la moyenne des deux angles de torsion qu'on a obtenus en touchant deux fois le premier point de la surface; cet angle moyen est le même que celui qu'on aurait obtenu directement par l'expérience, si on avait pu toucher le premier point au même instant où l'on a touché le second. En effet, la déperdition de l'électricité étant approximativement uniforme pendant un certain temps, il a dû s'en perdre la même proportion dans l'intervalle qui a séparé la troisième expérience de la seconde que dans celui qui a séparé la première de la seconde. La moyenne des résultats de la première et de la troisième expérience représente donc une expérience faite avec un état électrique semblable à celui sous l'influence duquel a été faite la seconde.

Parmi les expériences de Coulomb dont nous avons déjà parlé, je choisis la suivante, qui fera bien comprendre la méthode des alternatives. Il s'agit d'une lame d'acier isolée, longue de 30 centimètres, large de 2 centimètres 1/2 et épaisse d'un millimètre. Le plan d'épreuve avait 2 centimètres 1/2 de largeur. Coulomb applique d'abord le plan d'épreuve au milieu de la lame, puis à 2 centimètres 1/2 de distance de l'extrémité, et il obtient les résultats suivants :

Touché au milieu.	370°	
— à 2 cent. 1/2 de l'extrémité.		440°
— au milieu, une deuxième fois.	350°	
— à 2 cent. 1/2 de l'extrémité, une deuxième fois.		395°
— au milieu, une troisième fois.	320°	
Moyenne.	340°	417°

d'où l'on conclut que le rapport entre les réactions électriques du milieu de la lame et de la partie qui est à 2 centimètres 1/2 du bord est de 340 à 417,5, ou de 1 à 1,23.

§ 5. Emploi du plan d'épreuve dans les expériences précédentes.

L'emploi du plan d'épreuve pour déterminer les quantités relatives d'électricité qui se trouvent sur les différents points de la surface du conducteur électrisé a donné lieu à diverses remarques et à quelques objections que nous ne pouvons passer sous silence. Nous avons admis que ce plan, devenant pour ainsi dire partie de la surface sur laquelle il est superposé, l'enlever, c'est enlever cette partie de la surface avec l'électricité dont elle est chargée. Cette manière d'envisager le rôle du plan d'épreuve est contestée. Coulomb admet qu'il se charge en totalité d'une quantité d'électricité double de celle que possède la partie de la surface avec laquelle on le met en contact, de telle façon que chacune de ses deux faces en a autant. Il appuie son assertion sur le fait que si on touche une sphère électrisée et isolée avec un disque isolé mais non électrisé dont l'une des deux surfaces soit égale à celle de la sphère, celle-ci n'a plus, après le contact, que le tiers de l'électricité qu'elle avait primitivement, le disque en a donc pris le double de ce qui reste, effet qui est dû à ce que ses deux surfaces, qui sont chacune égales à celle de la sphère, se chargent également d'électricité. C'est, suivant Coulomb, le cas du plan d'épreuve, qui n'est lui-même qu'un disque.

Observons cependant que si ce disque est assez petit pour se confondre avec l'élément de la surface sur lequel il est appliqué et dont il devient ainsi partie intégrante, la première manière d'envisager son effet est plus exacte que la seconde, qui suppose

un disque de même surface que le corps avec lequel il est mis en contact.

Mais, quelle que soit la quantité absolue d'électricité que prenne le plan d'épreuve, la chose importante, c'est qu'il en prenne une quantité toujours proportionnelle à la réaction électrique de la partie de la surface avec laquelle il est mis en contact. Or, c'est ce qui se passe, ainsi que le prouvent plusieurs expériences de Coulomb, notamment la suivante. On a deux cylindres conducteurs, isolés, parfaitement semblablables. On électrise l'un des deux, et on détermine, avec le plan d'épreuve, le rapport qui existe entre la réaction électrique d'un point situé au milieu de sa longueur et celle d'un point situé à son extrémité. On touche ensuite le cylindre électrisé avec celui qui ne l'est pas; il est évident que l'électricité totale doit se partager complétement également entre les deux; par conséquent celui qui a été électrisé n'a plus en chacun de ses points que la moitié de l'électricité qu'il avait primitivement; mais le rapport entre les réactions électriques du point pris au milieu et du point situé à l'extrémité, doit être resté le même. Le plan d'épreuve confirme cette conclusion; preuve que, quelle que soit la quantité absolue d'électricité, il en prend bien une quantité proportionnelle à celle que possède la partie de la surface sur laquelle on l'applique.

Ajoutons que la quantité absolue d'électricité qu'emporte le disque est toujours très-petite par rapport à celle que possède le corps électrisé; de sorte qu'on peut, sans erreur sensible, affirmer que le contact du plan, lorsqu'il n'a été répété qu'un nombre de fois peu considérable, ne modifie nullement l'état électrique du corps.

D'autres objections à l'emploi du plan d'épreuve ont été faites par Harris; de nombreuses expériences lui ont prouvé que la quantité d'électricité enlevée à la surface d'un corps électrisé, au moyen d'un petit disque isolé et mince, peut être influencée par la position du point d'application, indépendamment de la quantité d'électricité possédée par ce corps au point touché, de sorte que la même quantité peut exister en deux points différents, et cependant, le plan d'épreuve se char-

ger inégalement quand il est mis en contact avec ces deux points. Il peut même arrivèr que, par l'effet de l'action des points voisins, le plan d'épreuve ne se charge nullement, lors même que l'élément de la surface avec laquelle il est mis en contact est fortement électrisé. Ces singulières anomalies tiennent aux effets de l'action à distance, soit de l'induction, qu'exercent les corps électrisés sur ceux qui ne le sont pas; phénomènes dont l'étude fait l'objet du chapitre suivant.

Mais avant de terminer celui-ci, ajoutons que les objections de M. Harris ne s'appliquant qu'à des cas exceptionnels, ne peuvent ébranler la confiance que les savants accordent aux résultats obtenus par Coulomb, dans lesquels il s'agit de la distribution de l'électricité dans les corps conducteurs de forme régulière. Peut-être, lorsqu'il s'agit de corps de forme irrégulière ou de plusieurs corps en contact, y aurait-il une nouvelle étude à faire, mais quel procédé employer si l'on est obligé de rejeter celui du plan d'épreuve? Je me permettrai d'en indiquer un, qui, s'il n'a pas la précision ni la sensibilité de ce dernier, a du moins l'avantage de faire voir aux yeux d'une manière immédiate la loi que suit la distribution de l'électricité. Il consiste à prendre un électroscope simple, soit pendule électrique dont la balle très-petite et très-légère est chargée de la même électricité que le corps, dont on l'approche. On voit alors, en la présentant aux différents points de la surface du corps, qu'elle est plus ou moins repoussée suivant les points en face desquels on la place. Ainsi, avec un ellipsoïde, la distance à laquelle elle est repoussée va en croissant à partir de l'extrémité du petit axe jusqu'à l'extrémité du grand. Avec une sphère, elle est partout également repoussée. Les plus légères différences dans la réaction électrique sont accusées d'une manière très-sensible par ce procédé qui, quoiqu'il ne soit pas lui-même à l'abri des objections que présente l'emploi du plan d'épreuve, serait peut-être susceptible d'être utilement perfectionné.

CHAPITRE III.

ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE.

§ 1. Développement de l'électricité par influence dans un conducteur isolé.

Si l'on présente à un corps conducteur isolé un corps électrisé, on développe dans le premier des signes électriques, lors même que les deux corps sont à une distance plus ou moins grande l'un de l'autre. Ces signes électriques disparaissent dès qu'on éloigne le corps électrisé. Ce phénomène constitue le développement de l'électricité à distance par influence ou par induction.

Pour faire l'expérience avec soin, on prend un cylindre de métal isolé B (fig. 42), et on attache à différents points de sa sur-

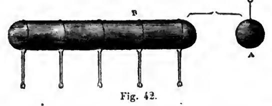


Fig. 42.

face de petits électroscopes à balle de sureau. On approche graduellement de ce cylindre un autre corps électrisé, la sphère A, par exemple, en ayant soin que le cylindre soit placé de façon que ce soit l'une de ses extrémités qui regarde le corps électrisé. Quand le cylindre n'est plus qu'à quelques centimètres de distance du corps électrisé, on voit les électroscopes diverger, du moins ceux qui sont placés à ses deux extrémités, car les électroscopes qui sont attachés aux points intermédiaires divergent d'autant moins qu'ils sont plus éloignés des deux bouts, et il en est même qui ne divergent pas du tout. Si on éloigne le corps électrisé, les balles des électroscopes retombent dans une posi-

tion naturelle, et toute trace d'électricité disparaît. On rapproche de nouveau les corps électrisés; la divergence recommence de la même manière.

Ce n'est pas tout. Si pendant que les électroscopes divergent on approche d'eux la balle électrisée d'un électroscope simple, on s'aperçoit que l'électricité qu'ils accusent n'est point la même à l'une des extrémités du cylindre qu'à l'autre. A l'extrémité la plus voisine du corps électrisé, elle est de nature contraire à celle de ce corps, négative si la première est positive; à l'extrémité la plus éloignée, elle est de même nature. Pour mieux connaître l'état électrique du cylindre pendant qu'il est sous l'influence du corps électrisé, il faut toucher successivement les différents points de sa surface avec le plan d'épreuve dont nous nous sommes servi pour étudier la distribution de l'électricité. On trouve ainsi que les deux électricités contraires sont à leur maximum aux deux extrémités du cylindre, qu'à partir de cette extrémité elles vont chacune en diminuant d'intensité jusqu'à un point où elles sont nulles, et qu'on nomme par cette raison *point neutre*. Le point neutre n'est jamais au milieu du cylindre; sa position dépend de la distance à laquelle les deux corps sont placés l'un par rapport à l'autre et de l'intensité de la charge électrique; mais il est, en tout cas, toujours plus rapproché de l'extrémité la plus voisine du corps électrisé.

Voici une expérience d'un physicien allemand, M. Mohr, qui a étudié avec beaucoup de soin ce sujet, déjà bien éclairci par les recherches de Coulomb. Le cylindre isolé avait 65 centimètres de longueur; le corps électrisé fut placé à la distance d'un centimètre de l'une des extrémités du cylindre; le point neutre se trouva sur la surface, à une distance d'un centimètre seulement de cette extrémité. Ainsi l'électricité négative (le corps électrisé étant positif) n'occupait qu'une partie de la surface du cylindre longue d'un centimètre, tandis que la positive occupait l'autre partie, longue de 64 centimètres. Une augmentation dans la distance respective des deux corps, comme une diminution dans la charge électrique du corps électrisé, aurait changé ces proportions et augmenté l'espace occupé par l'électricité négative, et diminué par conséquent celui qu'occupait la

positive, sans que toutefois jamais ce dernier pût cesser d'être supérieur au premier.

Dans les expériences qui précèdent, il faut avoir soin de placer le corps électrisé à une distance suffisante du conducteur isolé pour qu'il ne passe dans le second aucune portion de l'électricité du premier. Si en effet cette distance est trop petite, on voit partir une étincelle entre les deux corps, preuve qu'une partie de l'électricité de l'un a passé dans l'autre. Il peut même arriver, si l'air est humide, que ce passage d'électricité ait lieu graduellement d'une manière invisible; alors le corps conducteur isolé est électrisé par communication, et non plus par influence, ce dont on s'aperçoit facilement; car après avoir été soustrait à l'influence du corps électrisé, au lieu de revenir à l'état naturel, il se trouve chargé d'une électricité de même nature que celle de ce corps.

Mais, si en prenant les précautions nécessaires pour que cette transmission d'électricité n'ait pas lieu, on fait communiquer avec le sol le conducteur isolé pendant qu'il est soumis à l'influence, on le trouve chargé, après que l'influence a cessé, d'un excès d'électricité de nature contraire à celle du corps électrisé, négative si celui-ci est positif. Il faut avoir soin seulement de supprimer la communication du conducteur isolé avec le sol avant de le soustraire à l'influence, car, sans cela, son électricité négative s'écoulerait comme la positive.

Une remarque importante à faire, c'est que le corps électrisé n'éprouve, pendant qu'il électrise par influence un conducteur, d'autre perte de son électricité que celle qui résulte de l'imperfection des supports isolants et du contact de l'air et par conséquent celle qu'il subirait s'il était seul. C'est ce qu'il est facile de constater en touchant avec le plan d'épreuve le corps électrisé au même point avant qu'il ait exercé son action inductrice et après qu'elle a eu lieu.

Ces phénomènes sont une conséquence naturelle de la théorie des deux fluides électriques que nous avons déjà exposée. Ces deux fluides, éminemment subtils, sont doués de la propriété que les molécules de l'un attirent les molécules de l'autre, tandis que les molécules du même fluide se repoussent mutuellement. Il faut

admettre qu'ils préexistent l'un et l'autre dans un corps conducteur puisqu'on peut les y faire apparaître sans communiquer aucune électricité à ce corps. Mais ils y préexistent en proportion telle, qu'abandonnés à eux-mêmes, ils se neutralisent l'un l'autre sans cependant se détruire. Ils constituent ce qu'on appelle le *fluide neutre*, et le corps qui ne possède que ce fluide est dit être dans l'état *électrique naturel*, tandis qu'il est positif ou vitré s'il possède un excès d'électricité positive, négatif ou résineux s'il possède un excès d'électricité négative.

Quand on présente à un conducteur isolé qui est à l'état naturel un corps électrisé positivement, l'électricité positive de ce corps décompose le fluide neutre du conducteur, attire la négative et repousse la positive. Les deux électricités pouvant cheminer librement dans le conducteur, la négative se porte dans la partie la plus voisine du corps électrisé qui l'attire, et la positive est repoussée dans la partie la plus éloignée. Mais au moment où l'on enlève le corps électrisé, les deux électricités développées dans le conducteur ne sont plus soumises qu'à leur attraction mutuelle, et, comme elles sont en égale proportion, elles se neutralisent et reconstituent le fluide neutre. Si on touche le conducteur pendant qu'il est sous l'influence du corps électrisé, son électricité positive, chassée dans le sol par celle de même nature que possède le corps électrisé, ne se retrouve plus après que l'influence a cessé, pour reconstituer avec la négative le fluide neutre. C'est pourquoi le conducteur présente un excès d'électricité négative.

Après avoir montré comment les phénomènes d'induction rentrent dans la théorie, revenons-y encore, soit pour les étudier sous différentes formes, soit pour expliquer quelques faits particuliers qui en dépendent.

§ 2. Développement de l'électricité par influence dans plusieurs conducteurs successifs.

Observons d'abord que l'on peut, au moyen d'un seul corps électrisé, développer de l'électricité par influence dans un très-grand nombre de conducteurs isolés, tels que des cylindres métalliques. On n'a qu'à les placer les uns à la suite des autres sur

la même ligne, de manière que les extrémités de chacun d'eux soient à la même distance des extrémités de celui qui le précède et de celui qui le suit. On approche de l'extrémité antérieure du premier le corps électrisé, par exemple une sphère métallique positive. Aussitôt chaque cylindre isolé se trouve électrisé positivement dans celle de ses extrémités la plus éloignée de la sphère, négativement dans l'extrémité la plus rapprochée.

Si l'on touche avec la main le dernier des cylindres, on fait écouler, dans le sol, son électricité positive, et il arrive le plus souvent que l'électricité négative de ce dernier, rendue plus libre par le départ de la positive qui la retenait, se réunit à travers l'air sous forme d'étincelle avec la positive de l'avant-dernier, la négative de celui-ci avec la positive du suivant, et ainsi de suite jusqu'au premier dont l'électricité négative se combine avec la positive de la sphère électrisée. Ces étincelles, qui s'échappent ainsi simultanément à travers l'air, sont un signe de la neutralisation des électricités contraires; d'où il résulte que chacun des corps après que le phénomène a eu lieu, est revenu à son état naturel. Si l'on enlève la sphère électrisée sans avoir fait communiquer avec le sol aucun des cylindres, la neutralisation des deux électricités, au lieu de s'opérer de l'un à l'autre, se fait dans chacun d'eux séparément, et ils se retrouvent encore ainsi dans l'état naturel, sans qu'il y ait eu d'effets extérieurs sensibles.

§ 3. Effets des pointes dans les phénomènes d'induction et dans la machine électrique.

L'effet des pointes dans les phénomènes d'induction est très-remarquable. Nous avons vu que la forme en pointe détermine, dans la partie du conducteur qui la possède, une charge ou réaction électrique tellement plus considérable que dans le reste de la surface, que l'électricité le plus souvent s'en échappe pour se porter, soit dans l'air, soit sur les conducteurs les plus voisins. Aussi quand on présente à un conducteur terminé en pointe et isolé un corps électrisé, l'électricité de nature contraire, que l'induction développe dans le conducteur, s'accumu-

lant à sa pointe, en sort pour neutraliser à travers l'air celle du corps électrisé; c'est ainsi qu'on peut décharger le conducteur d'une machine électrique ou l'empêcher de se charger, en lui présentant à une distance de 20 à 30 centimètres ou plus grande encore, une pointe métallique qu'on tient à la main. Dans le jeu de la machine électrique il se passe un phénomène du même genre. Chaque partie du plateau de verre que le frottement a électrisée va passer successivement devant les pointes du conducteur isolé de la machine dont elle décompose, par influence, l'électricité naturelle, attirant la négative et repoussant la positive. La négative accumulée aux pointes en sort pour neutraliser la positive du plateau qui, passant de nouveau entre les coussins, reprend, par le frottement qu'il y éprouve, l'électricité positive qu'il a perdue. Quant à l'électricité positive du conducteur, privée de la négative qui est sortie par les pointes, elle ne peut reformer du fluide neutre et reste par conséquent en excès; c'est pourquoi, après un certain nombre de tours, le conducteur isolé de la machine se trouve chargé d'électricité positive. Ce n'est donc point, comme on le dit souvent par erreur, l'électricité positive du plateau de verre qui a passé dans le conducteur, c'est la négative du conducteur qui est sortie par les pointes et y a laissé la positive avec laquelle elle formait le fluide neutre et dont elle a été séparée par l'influence du plateau. Cette action inductrice continue à accumuler de l'électricité positive dans le conducteur jusqu'à ce que chaque point de la surface de celui-ci ait une réaction égale à celle qu'acquiert chaque point de la surface du verre par son frottement contre les coussins. En effet, lorsqu'on a atteint cette limite, il n'y a pas de raison pour que ce ne soit pas aussi bien l'électricité du conducteur qui agisse sur le plateau que l'électricité du plateau sur le conducteur. Il y a donc équilibre et le conducteur ne se charge plus; on comprend donc que la charge du conducteur doive être d'autant plus forte que la réaction électrique, déterminée sur le plateau par le frottement, est plus énergique; énergie qui dépend elle-même de la qualité du verre, de celle des frottoirs, de la manière dont ils sont plus ou moins bien ajustés, du degré de sécheresse de l'air et du plus

ou moins de soins qu'on prend pour dessécher et nettoyer la surface du plateau lui-même.

§ 4. Action à distance par influence sur les électroscopes.

C'est aussi au développement de l'électricité par influence qu'on doit rapporter le fait qu'il n'est pas nécessaire, pour agir sur un électroscope, de le toucher avec un corps électrisé, mais qu'il suffit d'en approcher ce corps à quelque distance. En effet, celui-ci, par son influence, décompose l'électricité naturelle de la partie métallique de l'électroscope située extérieurement, attire, près de lui, l'électricité de nom contraire à la sienne et repousse celle de même nom dans les feuilles d'or, les brins de paille, ou autres substances légères qui sont en communication avec cette partie métallique. L'électroscope se trouve ainsi chargé pendant qu'il est sous l'influence du corps électrisé de la même électricité que celle que possède ce corps ; mais pour qu'il la conserve, il faut alors le toucher avec le corps lui-même. Cependant, si pendant qu'il est soumis à l'action inductrice on le touche avec le doigt en un point quelconque de sa partie métallique extérieure, on le trouve ensuite chargé d'une électricité contraire à celle du corps électrisé, pourvu qu'on ait eu soin d'ôter le doigt avant d'éloigner ce corps. En effet, l'électricité de même nom obéissant à l'action répulsive, au lieu d'avoir été chassée dans les feuilles d'or, s'est écoulée dans le sol par l'intermédiaire du corps et du doigt de l'observateur. Il est donc resté dans l'instrument, quand il a été soustrait à l'action inductrice, un excès d'électricité contraire qui a fait diverger ses feuilles d'or. C'est une manière plus expéditive et plus commode de charger l'électroscope; mais il faut, quand on l'emploie, ne pas oublier que l'électricité qu'il accuse est de nature contraire à celle du corps avec lequel on agit sur lui.

§ 5. Électrophore.

Un instrument fondé sur le principe du développement de l'électricité par influence qui peut, avec avantage, remplacer dans bien des cas la machine électrique, est celui imaginé par

Volta qui l'a nommé *électrophore*. Il se compose d'un gâteau de résine coulé dans un moule circulaire de bois ou de métal d'un diamètre quelconque. Un disque de métal ou de bois, revêtu d'étain et d'un diamètre moindre que celui du gâteau, est muni d'un manche isolant fixé à son centre perpendiculairement à sa surface. Ce disque est entouré d'un rebord arrondi, afin d'éviter les arêtes vives par lesquelles l'électricité risquerait de s'écouler (fig. 43). On électrise le gâteau de résine, en battant sa surface avec une peau de chat ; puis on pose sur lui le disque métallique, en le tenant par le manche isolant, on le touche avec le doigt, et lorsqu'on l'enlève on le trouve chargé d'électricité positive. On peut répéter l'expérience un très-grand nombre de fois et même à plusieurs jours de distance, sans qu'il soit nécessaire d'électriser de nouveau le gâteau. Celui-ci garde très longtemps, à cause de sa faculté isolante et de son peu de tendance à attirer l'humidité de l'air, l'électricité résineuse qu'on a développée sur sa surface. Il faut seulement avoir soin de laisser reposer sur lui le disque métallique dont la présence empêche la déperdition de l'électricité qui résulterait du contact de l'air. Il n'est pas nécessaire d'ajouter que c'est l'électricité résineuse du gâteau qui, décomposant l'électricité naturelle du disque métallique, chasse la négative dans le sol par l'intermédiaire du doigt, et attire la positive qu'on retrouve dans le disque dès qu'on l'enlève. Si on le soulève sans l'avoir préalablement touché avec le doigt, on le trouve alors chargé, non d'électricité positive, mais d'une certaine quantité d'électricité négative qu'il a prise au gâteau par simple communication. Cette quantité est toujours très-faible à cause de la difficulté que l'électricité éprouve à quitter la résine.


Fig. 43.

L'électricité positive dont le disque se charge est assez énergique pour donner de fortes étincelles ; aussi s'en sert-on pour enflammer les gaz et pour un grand nombre d'expériences. On a même un appareil nommé *lampe électrique*, dans lequel un jet d'hydrogène est enflammé par l'étincelle que donne un

électrophore dont le disque métallique est, au moyen d'un cor-



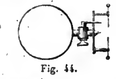
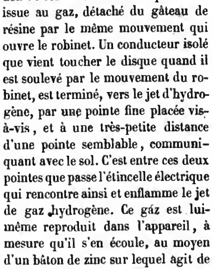


Fig. 44.



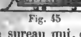
don de soie fixé au robinet qui donne issue au gaz, détaché du gâteau de résine par le même mouvement qui ouvre le robinet. Un conducteur isolé que vient toucher le disque quand il est soulevé par le mouvement du robinet, est terminé, vers le jet d'hydrogène, par une pointe fine placée vis-à-vis, et à une très-petite distance d'une pointe semblable, communiquant avec le sol. C'est entre ces deux pointes que passe l'étincelle électrique qui rencontre ainsi et enflamme le jet de gaz hydrogène. Ce gaz est lui-même reproduit dans l'appareil, à mesure qu'il s'en écoule, au moyen d'un bâton de zinc sur lequel agit de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique (fig. 44). Il faut avoir soin d'électriser de temps à autre, avec une peau de chat, le gâteau de résine et de coller sur celui-ci une petite bande d'étain en communication avec le sol et que touche le disque mobile quand il repose sur le gâteau afin de perdre son électricité négative.

§ 6. Rôle de l'influence dans les attractions électriques.

Le phénomène primitif de l'électricité, celui de l'attraction des corps légers par un corps électrisé, est un véritable phénomène d'induction. Il n'y a pas d'attraction pas plus que de répulsion entre un corps électrisé et un corps qui ne l'est pas; il n'y en a qu'entre des corps électrisés tous les deux. Aussi, quand on présente un bâton de cire frotté à des corps légers, tels que des morceaux de papier ou des balles de sureau, le bâton de cire décompose leur électricité naturelle, repousse dans le sol leur électricité négative; ceux-ci, gardant alors un excès d'électricité positive, obéissent à l'attraction que doit exercer un corps électrisé négativement sur un corps électrisé positivement.

A l'appui, on peut citer les faits suivants : le premier, c'est que si les corps légers sont d'une matière isolante, ils ne sont pas attirés par un corps électrisé, parce que leur électricité naturelle ne peut pas être décomposée aussi facilement que lorsqu'ils sont conducteurs ; le second fait, c'est que si les brins de papier ou les autres corps légers reposent sur une surface isolante, telle qu'une plaque de verre ou de résine, ils ne sont plus aussi facilement attirés, parce que celle de leurs deux électricités qui est repoussée ne peut plus les quitter pour se rendre dans le sol ; alors l'autre électricité ne peut que difficilement l'emporter par sa puissance attractive sur la force répulsive de la première. Pour qu'il n'y ait point d'attraction du tout, il est nécessaire que les corps légers soient minces et petits ; des balles de sureau, si leur diamètre dépasse trois ou quatre millimètres, sont attirées quand on approche très-près d'elles le corps électrisé, lors même qu'elles sont placées sur une surface isolante, parce que l'électricité contraire à celle que possède le corps, est dans une partie de leur surface sensiblement plus rapprochée de ce corps que celle où se trouve accumulée l'électricité de même nom.

Une expérience assez intéressante et assez élégante, qui rentre dans l'explication que nous venons de donner, consiste à placer sur un disque de métal, muni d'un pied qui communique avec le sol, des petites balles de sureau ou de liége, de recouvrir le tout d'une cloche de verre dont la partie supérieure ouverte est munie d'une boîte à cuir à travers laquelle passe à frottement juste une tige qui porte à son extrémité inférieure un disque de métal semblable au premier. On place ce disque à une distance de 10 à 20 centimètres du premier ; on arrive dans chaque cas à trouver par le tâtonnement la distance la plus convenable. On fait communiquer la tige et par conséquent le disque supérieur avec le conducteur d'une machine électrique en activité (fig. 45) ; l'électricité positive attire, par l'effet d'induction que nous venons d'expliquer, les petites balles de sureau qui, en


Fig. 45

arrivant en contact avec la surface inférieure du disque constamment positif, se déchargent de l'électricité négative qu'elles avaient acquise par influence et en prennent de la positive par communication; ce qui fait qu'immédiatement repoussées elles retombent sur le disque inférieur qui, communiquant avec le sol, leur enlève leur électricité positive. Revenues à leur état naturel, leur électricité naturelle est de nouveau décomposée, elles sont attirées et repoussées encore; elles exécutent ainsi, aussi longtemps que l'électricité de la machine arrive au disque supérieur, ces mouvements alternatifs en se heurtant de mille manières. Cette expérience, qui semble n'être qu'un simple jouet, doit la célébrité dont elle jouit à ce qu'elle a donné naissance à une théorie de la grêle imaginée par Volta et que nous aurons occasion d'exposer plus loin. On peut faire l'expérience plus simplement en se servant d'une cloche de verre dont on électrise la surface intérieure en touchant ses différents points avec le conducteur d'une machine électrique en activité. Puis on la renverse sur une table au-dessus d'un tas de petites balles de sureau qui se mettent aussitôt à danser dans l'intérieur de la cloche, attirées et repoussées qu'elles sont successivement par sa surface qui, à cause de sa faculté isolante, garde longtemps l'électricité qu'on lui a donnée (fig. 46).



Fig. 46.

On remplace quelquefois les balles de sureau par des morceaux de liége auxquels on donne une forme quelconque; par exemple, celle de petits bons hommes; c'est ce qu'on nomme *la danse des pantins;* il suffit dans ce cas de placer deux disques dont l'un communique avec le conducteur de la machine, et l'autre avec le sol parallèlement l'un à l'autre à une distance de vingt centimètres environ, mais qui peut être plus ou moins grande, suivant la force de la machine; c'est entre ces deux disques que s'opère le mouvement. On peut également remplacer les pantins par une feuille d'or battu qu'on voit alors voltiger entre les disques de métal (fig. 47).

Un appareil fondé sur le même principe et qui a quelque

importance, parce qu'il sert dans plusieurs pays à accuser la présence d'un nuage électrisé, est le *carillon électrique* (fig. 48). Une petite boule métallique, fixée à l'extrémité d'un cordon de soie dont l'autre extrémité est attachée à un support horizontal qui fait partie de l'appareil, est suspendue entre un timbre qui communique avec le sol et un timbre semblable qui est mis en communication par son support avec la source d'électricité, par exemple, le conducteur de la machine électrique; la petite balle oscille entre les deux timbres comme la balle de sureau entre les deux disques et elle fait entendre par ses chocs répétés une suite de sons musicaux. Le même appareil porte quelquefois plusieurs balles de métal semblables à la précédente et pareillement suspendues, ainsi que le nombre de timbres nécessaires pour que les mouvements de va-et-vient puissent s'opérer. Le tout est disposé de façon qu'il y ait alternativement un timbre et une boule de métal, et que des deux timbres entre lesquels chaque boule se trouve placée, l'un communique avec le sol et l'autre avec un support isolé destiné à lui transmettre l'électricité.


Fig. 47.


Fig. 48.

§ 7. Quelques effets remarquables de l'électricité par influence.

Parmi les nombreuses expériences auxquelles le développement de l'électricité par influence donne naissance, nous citerons encore quelques-unes qui ont un intérêt d'application.

A peu de distance du conducteur d'une machine électrique en activité, on fait tomber sur un plateau isolé en communication avec un électroscope, des gouttes d'eau provenant d'un récipient métallique que l'on tient à la main ou qu'on fait communiquer avec le sol d'une autre manière. Les gouttes d'eau accusent après leur chute une électricité de nature contraire à

celle du conducteur. Ce même effet est produit d'une manière encore plus sensible en dirigeant sur le plateau métallique le jet d'eau d'une fontaine de compression qu'on tient à la main, en ayant soin que le jet passe près du conducteur de la machine. Dans ces expériences, les gouttes d'eau qui sortent du vase ont, avant de se séparer du jet, leur électricité naturelle décomposée par l'influence du conducteur; leur électricité positive est chassée dans le sol, la négative reste dans l'eau et affecte par conséquent l'électroscope. M. le professeur Bailli a obtenu le même résultat en substituant à l'électricité de la machine, l'électricité positive dont l'atmosphère dans les jours sereins est constamment chargée. Il a recueilli dans un récipient isolé et en communication seulement avec un électroscope les gouttes d'eau qui tombaient d'un jet d'eau très-élevé, et il les a trouvées chargées d'électricité négative; c'était un effet d'induction produit par l'électricité positive de l'air. Il est probable que l'électricité négative que Volta, Trallès et d'autres physiciens ont trouvée dans l'eau qui tombe des cascades naturelles, a la même origine et qu'elle n'est pas due, comme on avait paru le croire, à ce que le globe terrestre lui-même d'où partent ces gouttes serait négatif. Du moins on ne peut pas tirer cette conclusion de l'observation que nous venons de rapporter, puisqu'elle s'explique très-naturellement par la seule intervention de l'électricité positive de l'atmosphère.

Parmi les effets remarquables d'influence que peut exercer l'électricité dont l'air est constamment chargé, nous citerons encore l'observation faite par M. Peltier, qu'il suffit d'élever ou d'abaisser brusquement un électroscope pour le charger d'électricité positive ou négative. C'est probablement à la même cause que doivent être attribués les phénomènes électriques observés récemment par M. Palagi, qui a remarqué qu'il suffit de rapprocher ou d'éloigner l'un de l'autre deux corps, pour les charger d'électricité négative ou positive. Nous reviendrons sur ces expériences en nous occupant de l'électricité atmosphérique.

Un autre effet de l'induction électrique assez remarquable est celui que présentent les corps organisés qui y sont soumis. Galvani a remarqué le premier qu'une grenouille vivante ou tuée

depuis moins de quatre ou cinq heures, suspendue à quelque distance du conducteur d'une machine électrique, mais sans communication directe avec lui, éprouve de vives commotions quand on charge le conducteur, et encore plus, quand, après qu'il a été électrisé, on le décharge en tirant une étincelle. Ces commotions sont dues, la première à la décomposition de l'électricité naturelle qui se fait dans le corps de l'animal par l'influence de l'électricité positive de la machine, la seconde bien plus vive, à la recomposition subite des deux électricités qui s'opère dans la grenouille elle-même quand la cause de l'induction vient à cesser brusquement par la décharge du conducteur de la machine. Les commotions de cette espèce qui impriment au corps de l'animal comme une sorte de convulsion s'appellent *choc en retour*. En présence d'une puissante machine, un homme éprouve des secousses analogues; lorsque deux personnes sont placées près du conducteur, si l'une tire des étincelles, l'autre éprouve chaque fois à l'instant même une violente commotion sans qu'aucune trace d'électricité ne passe entre elle et le conducteur; c'est là encore l'effet du choc en retour; quand nous nous occuperons des effets de la foudre, nous verrons qu'un nuage orageux peut agir de la même manière et foudroyer aussi bien par le *choc en retour* que par le *choc direct*.

Indépendamment de cet effet, une personne placée près du conducteur d'une machine électrique éprouve pendant qu'on la charge des sensations extraordinaires au visage et aux mains; ses cheveux se hérissent plus ou moins fortement, une toile d'araignée semble couvrir son visage; ces effets sont tous dus à la décomposition de l'électricité naturelle du corps de l'observateur par l'influence à distance et à l'écoulement des deux électricités séparées, l'une dans le sol, l'autre à travers l'air vers le conducteur électrisé.

CHAPITRE IV.

CONDENSATEUR ET BOUTEILLE DE LEYDE.

§ 1. Principe des électricités dissimulées.

Nous avons étudié, dans le chapitre précédent, les effets d'induction en ne nous occupant que du corps sur lequel elle s'opère. Mais celui qui la produit éprouve lui-même un genre d'influence qui résulte de l'action qu'exerce sur sa propre électricité l'électricité qu'il a développée dans le conducteur rapproché. Cette double influence mutuelle des deux électricités donne naissance aux phénomènes de l'électricité dissimulée. Nous nous servirons, pour les étudier, d'un appareil composé de deux disques métalliques parfaitement semblables, de 20 à 30 centimètres de diamètre, placés verticalement chacun sur un support isolant en verre; les deux supports sont eux-mêmes fixés par leur extrémité inférieure sur une pièce mobile à coulisse, de telle façon qu'avec une manivelle, ou par tout autre moyen, on peut éloigner ou rapprocher aussi près que possible les deux disques, dont les faces demeurent toujours parfaitement parallèles. Chaque disque porte un électroscope à balles de sureau. Nous appellerons l'un des disques A et l'autre B (fig. 49). On

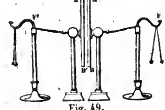


Fig. 49.

électrise A et on approche B, dont l'électricité naturelle est aussitôt décomposée par l'influence de A, que nous supposerons positif. On touche B avec le doigt pour donner issue à son électricité positive; aussitôt l'électroscope de B cesse de diverger, et celui de A n'éprouve plus qu'une divergence très-faible. Mais si l'on éloigne A et B l'un de l'autre en ayant soin de ne pas les toucher, on voit aussitôt les deux électroscopes diverger forte-

ment; celui de B indique de l'électricité négative, celui de A de la positive. On rapproche de nouveau les deux disques l'un de l'autre; de nouveau la divergence de l'électroscope de B cesse, et celle de l'électroscope de A diminue. Le même phénomène peut se reproduire plusieurs fois, si l'air est bien sec et les supports bien isolants; car, sans cette précaution, la déperdition de l'électricité dont les disques sont chargés s'opérerait rapidement, et les effets cesseraient bien vite. La disparition de l'électricité totale de B et de la plus grande partie de celle de A n'est qu'apparente, puisqu'il suffit d'éloigner les deux disques l'un de l'autre pour que ces deux électricités reparaissent avec toute leur intensité; aussi on dit qu'elles sont dissimulées quand elles sont dans cet état latent qui résulte de la proximité des disques. Cet état est attribué à la tendance que les deux électricités auraient à se porter l'une vers l'autre en vertu de leur attraction mutuelle, tendance à laquelle elles ne peuvent obéir à cause de la résistance qu'oppose à leur réunion la couche d'air isolante interposée, mais qui les porte en entier sur les portions des surfaces des deux disques qui sont en regard; elles sont comme neutralisées l'une par l'autre; nous disons *comme*, parce que si elles étaient en effet neutralisées elles ne reparaîtraient plus séparément quand on éloignerait les deux disques. Le nom d'électricités dissimulées qu'on a donné à cet état, pour le distinguer de celui d'électricités neutralisées, n'exprime, en réalité, qu'un fait qui découle immédiatement du principe du développement de l'électricité par influence. Aussi aurions-nous pu nous borner à le signaler dans le chapitre précédent, si l'importance des deux instruments, dont il est l'origine, ne nous avait pas engagé à leur consacrer un chapitre distinct.

Nous avons dit que tandis que, à l'état dissimulé, la totalité de l'électricité de B n'était plus sensible, une petite partie de celle de A restait apparente. On nomme cette portion l'*électricité libre*. Elle provient de ce que A n'a pu, à cause de la distance qui le sépare de B, développer par influence dans B une quantité d'électricité négative aussi considérable que celle qu'il possède lui-même. Il en résulte que, tandis que cette dernière peut, malgré la distance et parce qu'elle est la plus forte, dissi-

muler toute la négative de B, celle-ci, plus faible, ne peut, à son tour, dissimuler toute la positive de A; il en reste donc sur A une certaine proportion qui n'est pas dissimulée, mais qui sert, avec celle qui l'est, à dissimuler toute l'électricité négative de B. On touche A avec le doigt; aussitôt la petite quantité d'électricité libre qu'il possédait disparaît; la dissimulée ne s'écoule point dans le sol, étant retenue par l'action de B; au même instant où l'électroscope de A cesse de diverger, celui de B diverge à son tour, preuve que l'électricité de B n'est plus dissimulée en totalité, ce qui provient de ce que A a perdu une partie de son électricité. Une partie de l'électricité de B est ainsi devenue libre à son tour, sans toutefois qu'il y ait eu diminution dans la quantité totale d'électricité que possédait ce disque, quantité qui continue à dissimuler la même proportion de celle de A. Cette proportion est devenue la totalité depuis qu'on a ôté à A sa partie libre. Si maintenant on touche B, on enlève la partie de l'électricité qui était devenue libre sur ce corps; alors une partie de celle qui était dissimulée sur A par l'action de la totalité de l'électricité de B devient libre : ce double effet se manifeste par l'absence des divergences dans l'électroscope de B et l'apparition d'une légère divergence dans celui de A. On peut encore ôter à A cette nouvelle dose d'électricité libre et en faire naître immédiatement une sur B, puis toucher encore B, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'ayant ainsi graduellement fait passer toute l'électricité dissimulée de chacun des disques à l'état de liberté par de petites doses successives, on les ait complétement déchargés. C'est ce qu'on appelle la *recomposition lente* des deux électricités. La *recomposition subite* est celle qui a lieu quand, en réunissant les deux disques par les deux branches d'un excitateur, on permet aux deux électricités dissimulées de se réunir immédiatement à travers une couche mince d'air, ce qu'elles font en donnant naissance à une étincelle qui jaillit avec beaucoup d'éclat et de bruit.

La dissimulation des électricités est d'autant plus complète que les disques sont plus rapprochés l'un de l'autre, ce qui tient à ce que l'attraction mutuelle des deux électricités devient d'autant plus forte que la distance est plus faible. Mais il faut laisser

une couche d'air suffisamment isolante, et par conséquent suffisamment épaisse, pour s'opposer à la réunion directe, sous forme d'étincelle, des deux électricités opposées. Aussi la distance à laquelle on peut approcher les deux disques l'un de l'autre dépend-elle de l'intensité de la charge électrique donnée à A et du degré d'humidité de l'air et par conséquent de sa faculté isolante.

Toutefois, on peut obtenir des effets beaucoup plus prononcés en remplaçant la couche d'air par une substance telle que le verre ou la résine parfaitement isolante, lors même qu'elle est en lame très-mince. Il est facile alors d'approcher les disques à une très-petite distance l'un de l'autre, sans que l'on risque d'opérer la neutralisation des deux électricités. Il en résulte que A développe par induction dans B une beaucoup plus grande quantité d'électricité négative; et à son tour, une beaucoup plus forte proportion de l'électricité de A est dissimulée. Dans l'application, le choix de cette substance isolante et l'épaisseur à lui donner dépendent du but qu'on se propose. Ce but est double et a donné naissance aux deux appareils connus sous le nom de *condensateur* et de *bouteille de Leyde*. Commençons par exposer le principe commun sur lequel ils reposent; nous passerons ensuite aux différences qui les caractérisent quant au but et par conséquent quant à la forme qu'on leur a donnée.

§ 2. Théorie du condensateur et de la bouteille de Leyde.

Nous avons vu qu'avec une machine électrique, un conducteur ne peut prendre une charge électrique plus forte que celle qui imprime aux différents points de sa surface une réaction électrique égale à celle du plateau. Il en est de même avec toute source d'électricité. La charge varie donc avec la réaction électrique de la source, mais on peut augmenter la quantité totale d'électricité accumulée sur un conducteur isolé par l'effet d'une même source en étendant la surface de ce conducteur. En effet, comme l'électricité dont est chargé un conducteur peut librement s'y mouvoir, il suffit d'en toucher un point pour qu'elle s'y porte toute, et comme chaque élément de la surface

a la même réaction électrique, savoir celle de la source, plus cette surface sera étendue, plus il y aura d'éléments ayant la même réaction électrique, plus par conséquent sera considérable la somme totale d'électricité. C'est d'après ce principe que Volta avait imaginé un système de conducteurs électriques terminés par des demi-sphères, et suspendus au moyen de cordons de soie isolants; il les mettait en communication avec le conducteur d'une machine électrique en activité, et il accumulait ainsi par le moyen d'une même machine une quantité d'électricité d'autant plus grande que l'ensemble de ces conducteurs présentait une surface plus considérable : il nommait ces conducteurs *conducteurs secondaires*. Ce procédé avait l'inconvénient d'exiger un développement embarrassant de conducteurs, en outre celui de répartir une quantité donnée d'électricité sur une très-grande surface, et de l'exposer par là à une déperdition rapide par le contact de l'air. Le principe des électricités dissimulées a fourni le moyen d'atteindre le même but, tout en évitant les inconvénients que nous venons d'indiquer, et cela en permettant d'accumuler sur une même surface une quantité d'électricité plus considérable que celle dont elle se chargerait naturellement.

Pour bien concevoir la manière dont on obtient ce résultat, reprenons l'appareil qui nous à servi à démontrer le principe et mettons le disque A en communication avec la source d'électricité. Chacun des points de ce disque prendra une réaction électrique égale à celle de la source; approchons le disque B et touchons-le avec le doigt. Aussitôt, conformément à ce que nous avons vu, la plus grande proportion de l'électricité de A sera dissimulée, il n'y restera qu'une quantité libre qui, se répandant sur toute la surface, y déterminera en chacun de ses points une réaction électrique bien inférieure à la primitive; mais A, en communication avec la source, pourra y reprendre de l'électricité en quantité suffisante pour que la réaction électrique, en chacun des points de sa surface, devienne de nouveau égale à celle de la source; nouvelle décomposition de l'électricité naturelle de B, nouvelle dissimulation de celle de A; à chaque opération la quantité qui demeure libre de-

vient plus grande parce que, comme elle est une même proportion de l'électricité totale pour une même distance des deux disques, plus la quantité absolue ou totale devient considérable, plus la quantité proportionnelle s'accroît aussi. Lors donc que cette quantité libre est devenue telle, qu'à elle seule elle donne à chacun des points du disque A une réaction électrique égale à celle de la source, alors on est parvenu à la limite de l'accumulation possible. Le disque A contient, dans ce moment, une quantité d'électricité totale composée de deux éléments, savoir : la portion dissimulée et la portion libre dont la réaction est égale à celle de la source et qui serait celle dont le disque se serait chargé, s'il n'avait pas été sous l'influence de B, c'est-à-dire s'il était resté dans les conditions ordinaires.

On a donc réussi à condenser dans A une quantité d'électricité beaucoup plus considérable que celle qu'on y aurait accumulée en le mettant simplement en communication avec la source. Il suffit ensuite d'éloigner A de B pour rendre libre la partie dissimulée qui s'ajoute alors à celle qui ne l'est pas et pour obtenir ainsi sur chaque élément de la surface de A, une réaction électrique bien supérieure à celle de la source avec laquelle pourtant on la charge. Le pouvoir condensant de l'appareil est le rapport qui existe entre la quantité totale d'électricité dont se charge le plateau quand il est sous l'influence de B et celle dont il se charge quand il n'est pas sous cette influence. Pour obtenir ce rapport il suffit de déterminer avec le plan d'épreuve et la balance de torsion, la réaction électrique d'un point de la surface de A quand sous l'influence de B il n'y a qu'une faible portion de son électricité qui soit libre et quand hors de cette influence, la totalité de l'électricité dont il est chargé est devenue libre. Ce mode de détermination ne peut pas s'appliquer au cas où l'électricité que l'appareil possède est très-faible, cas le plus important; car la portion qui est libre est trop peu considérable pour que le plan d'épreuve puisse en être sensiblement affecté. Dans ce cas il vaut mieux, quand on a séparé les deux disques, les toucher successivement avec le plan d'épreuve et déterminer ainsi le rapport qui existe entre leurs charges totales. Au moyen de ce rapport et par un calcul

très-simple, on arrive à trouver celui qui existe entre l'électricité totale dont le disque A est chargé et la quantité d'électricité qu'il conserve à l'état libre quand il est sous l'influence de B; ce qu'on voulait connaître [1].

Le pouvoir condensant est d'autant plus grand, que la couche isolante qui sépare les deux disques est plus mince; mais il ne faut pas qu'elle soit assez mince pour que les électricités puissent se réunir à travers cette couche. C'est ici qu'il faut distinguer les deux buts qu'on se propose avec les appareils condensateurs. L'un de ces buts est de chercher à rendre sensibles, par leur action sur l'électroscope, des sources d'électricité dont la réaction serait trop faible pour agir directement sur lui; il faut donc une couche isolante aussi mince que possible, parce que d'une part il faut que la condensation soit la plus forte possible et que d'autre part on ne risque pas, si la matière de la couche est très-isolante, que les deux électricités soient assez intenses pour vaincre sa résistance; ce genre d'appareil a pris le nom particulier de *condensateur*. Le second but est d'accumuler, avec une source donnée aussi puissante que possible, une quantité d'électricité aussi considérable qu'on le peut, afin de produire de grands effets. Il faut alors que la couche isolante soit assez épaisse et isolante pour opposer un obstacle suffisant à la tendance énergique qu'ont les deux électricités à se réunir. On emploie dans ce cas du verre, parce que sa structure homogène fait qu'on ne court pas le risque qu'il présente, comme une couche mince de vernis isolant, des solutions de continuité et parce qu'en même temps il conserve, lors même qu'il est très-mince, sa faculté isolante. Ce second genre d'appareil se nomme, suivant la forme particulière qu'on lui donne, *tableau magique* ou *bouteille de Leyde*.

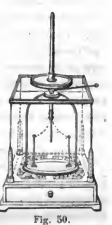
§ 3. Condensateur.

Le condensateur a été imaginé par Volta; il a été primitivement formé d'un disque en bois recouvert de taffetas gommé et

[1] Voyez, pour les développements mathématiques relatifs à l'électricité condensée, la note B.

d'un disque métallique muni d'un manche isolant qu'on pose sur le disque en bois. Le plateau métallique est mis en communication avec la source d'électricité; il joue le rôle du disque A, le plateau en bois joue celui du disque B, et le taffetas gommé est la couche isolante mince qui empêche la recomposition immédiate des deux électricités accumulées sur les deux plateaux. Quand le plateau métallique a été chargé on l'enlève et on le porte à l'électroscope qui indique la nature et jusqu'à un certain point l'intensité de l'électricité de la source.

Le condensateur le plus généralement usité est celui *à lame d'or* ainsi nommé, parce qu'il est adapté à un électroscope à lames d'or (fig. 50). Il se compose de deux plateaux métalliques bien dressés de 15 centimètres au moins et de 30 au plus de diamètre. L'un de ces plateaux est vissé sur le prolongement extérieur de la tige métallique de l'électroscope qui porte les feuilles d'or; l'autre est muni d'un manche isolant fixé verticalement à son centre et est placé sur le premier de manière à le recouvrir exactement. Les deux plateaux ont été enduits sur leur surface de contact de plusieurs couches appliquées successivement, d'un vernis très-liquide formé par la dissolution de la gomme laque dans l'alcool. Ce vernis, en séchant, forme une pellicule dont l'épaisseur n'est pas d'un dixième de millimètre, mais qui est suffisante pour empêcher la recomposition des électricités, lorsque celles-ci ne sont pas très-fortes. Les plateaux sont ainsi presqu'en contact, et la condensation de l'électricité est aussi grande que possible; aussi le pouvoir condensant de ces appareils est-il très-considérable; mais il ne peut supporter que de très-faibles charges qui sont celles, au reste, qu'il est destiné à recevoir. Il est important que les deux plateaux soient adaptés l'un à l'autre aussi bien que possible et par conséquent que leur surface soit bien plane. La grandeur de ces surfaces a, par cette raison, une limite


Fig. 50.

qu'il est impossible de dépasser, parce que la construction en deviendrait trop difficile, vu la condition que nous venons d'indiquer; la manœuvre en serait aussi assez pénible, car il faut pouvoir enlever facilement le plateau supérieur et avoir soin de l'enlever perpendiculairement sans exercer contre l'autre un frottement qui serait, par lui-même, une source d'électricité et troublerait par conséquent les résultats. Toutefois ces réserves une fois faites, il est avantageux d'avoir la plus grande surface possible, puisque la quantité d'électricité accumulée est proportionnelle à cette surface. L'expérience a démontré qu'on ne peut, sans tomber dans les inconvénients que nous venons de signaler, dépasser 30 centimètres de diamètre. Les plateaux sont ordinairement en laiton, et si c'est possible, en laiton doré, afin d'être protégés contre l'action chimique de l'air humide, des vapeurs et des liquides avec lesquels ils peuvent se trouver en contact. Quelquefois on trouve des signes électriques en séparant les deux plateaux lors même qu'il n'y a eu aucune source électrique en communication avec l'un ou avec l'autre. Cette erreur est due à une petite quantité d'électricité provenant des expériences précédentes qui a pénétré dans les couches de vernis et ne s'en dégage que difficilement. Il faut pour l'enlever placer entre les deux disques une feuille d'étain très-mince et la laisser jusqu'à ce qu'on se soit assuré qu'après avoir été mis en contact immédiat l'un avec l'autre, les plateaux ne dégagent, par le fait seul de leur séparation, aucune trace d'électricité. Il est essentiel de toujours constater cette absence de signes électriques spontanés avant de faire une expérience.

On met en général, pour plus de commodité, la source d'électricité en communication avec le plateau supérieur du condensateur, qu'on nomme le collecteur, et on touche avec le doigt le plateau inférieur. Quand on sépare les deux plateaux, c'est l'électricité devenue libre du plateau inférieur qui affecte l'électroscope; or, il ne faut pas perdre de vue qu'elle est de nature contraire à celle du supérieur, et par conséquent à celle de la source soumise à l'expérience. Avant de recommencer une seconde expérience, il ne faut pas oublier de décharger, en

les touchant avec le doigt, les deux plateaux également, et, en général, il ne faut jamais les laisser chargés, surtout quand ils sont en contact, parce que l'électricité qu'ils conservent pénètre dans les couches de vernis d'où nous avons vu qu'il est très-difficile de la chasser.

Nous sommes entrés dans des détails minutieux sur le condensateur, parce que c'est un des appareils les plus usuels et en même temps les plus délicats de l'électricité; c'est par son secours que Volta a réussi à montrer qu'une plaque de zinc, tenue à la main et mise en contact avec le plateau supérieur, le chargeait d'électricité négative, expérience qui a été l'origine de la découverte de la pile voltaïque. Quand on fait cette expérience, il faut avoir soin que la plaque de zinc soit bien décapée, surtout dans les points où elle touche le disque. On peut également charger le plateau d'électricité positive en interposant entre le plateau et la plaque de zinc, qu'on tient toujours à la main, une rondelle de drap ou de carton légèrement humectée avec de l'eau salée. Dans les deux cas, il ne faut pas négliger de toucher le plateau inférieur avec une des mains, pendant que de l'autre on tient la plaque de zinc sur le plateau supérieur.

L'expérience que nous venons de citer et les autres expériences délicates auxquelles sert le condensateur exigent que l'air de la chambre où l'on opère soit aussi sec que possible, ou que du moins l'électroscope et toutes les pièces qui le composent soient bien à l'abri de l'humidité. C'est dans ce but qu'on recouvre le tout d'une cage de verre dans l'intérieur de laquelle on place, pour opérer le dessèchement, du chlorure de calcium.

M. Peclet a augmenté encore la sensibilité du condensateur en y ajoutant un troisième plateau interposé entre les deux autres, et il a nommé son appareil condensateur multiplicateur (fig. 51). Le plateau inférieur est, comme précédemment, vissé sur l'électroscope; le second est muni d'un manche isolant, et il est verni sur ses deux faces; le troisième, qui n'est verni que sur sa surface inférieure, est percé à son centre d'un trou sur les bords duquel est scellé un tube de verre qui, tout en servant de manche isolant, livre passage au bâton de verre qui forme

le manche isolant du second. On peut donc ainsi superposer facilement les trois plateaux, et enlever successivement le troisième et le second. Pour opérer, on met la source d'électricité en communication avec le troisième, et on touche le second avec le doigt au moyen d'un petit appendice métallique qui part de son rebord; puis, celui-ci chargé, on enlève le troisième et on touche avec le doigt le premier, l'électricité du second se trouve ainsi presque toute dissimulée; on le charge de nouveau en replaçant le troisième qui est toujours en communication avec la source, puis on ôte ce troisième et on retouche le premier, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'électricité du second ne puisse plus être dissimulée par le premier. Alors on enlève d'abord le troisième, puis le second, et le premier se trouve chargé d'une électricité libre considérable et de même nature dans ce cas que celle de la source; car elle est de nature contraire à l'électricité du second plateau, laquelle est elle-même différente de celle du troisième, qui reçoit sa charge directement de la source. Il est facile de comprendre que cet appareil condense une seconde fois le produit d'une première condensation; aussi peut-on rendre sensibles les sources d'électricité les plus faibles. Mais il est comme tous les instruments trop délicats, d'un emploi un peu dangereux, et il est en outre d'un maniement assez long et incommode. Il faut donc le réserver pour des cas exceptionnels et ne s'en servir qu'avec les plus grandes précautions. Ajoutons que les plateaux qu'emploie M. Péclet pour construire son condensateur sont faits d'une glace dépolie, qu'ils ont été aplanis avec beaucoup de soin et qu'ils sont recouverts d'une feuille d'or battu, qu'on applique sans enduit en se contentant d'humecter légèrement avec l'haleine la surface du verre.

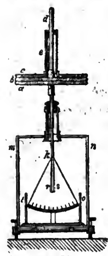


Fig. 51.

M. Gaugain a proposé dernièrement un procédé plus simple et d'un usage facile et avantageux; c'est d'avoir deux

condensateurs, l'un indépendant de l'électroscope et présentant une grande surface, l'autre n'ayant que de petites dimensions et fixé à l'électroscope. On charge d'abord le premier en le mettant en communication avec la source d'électricité, puis séparant les deux plateaux, on se sert de l'un d'eux pour charger le petit condensateur de l'électroscope. On comprend que ce dernier doit se charger beaucoup plus que lorsqu'il est mis directement en communication avec la source électrique qui a une tension bien moindre. On peut augmenter encore l'effet en accumulant, sur le plateau du condensateur de l'électroscope, plusieurs charges du grand plateau, au lieu de se borner à une seule.

§ 4. Tableau magique et bouteille de Leyde.

Le tableau magique nommé aussi carreau étincelant, se compose d'une lame de verre dont les deux faces sont recouvertes d'une feuille mince d'étain (fig. 52); on a soin de laisser à nu sur chacune des faces de la lame de verre un rebord de 7 ou 8 centimètres de largeur, afin que les électricités contraires accumulées sur les feuilles d'étain ne puissent se réunir immédiatement par les bords de ces feuilles. On met en communication l'une des feuilles d'étain avec la source d'électricité et l'autre avec le sol. Puis lorsqu'elles sont chargées, on peut avec l'excitateur réunir les deux lames métalliques et on obtient une étincelle très-vive. Cet appareil se nomme carreau étincelant, parce qu'on substitue quelquefois à l'une des feuilles métalliques une poussière métallique qu'on fait tenir sur le verre avec de la gomme; il en résulte que la décharge, quand elle s'opère dans l'obscurité, donne lieu sur la face ainsi recouverte à une brillante lueur provenant des étincelles qui, au moment de la neutralisation des deux électricités, s'échappent entre tous les grains de métal.

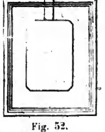


Fig. 52.

La bouteille de Leyde n'est qu'un tableau magique dont on a fait un cylindre; la couche isolante est aussi du verre; mais au

lieu d'être une surface plane, elle a la forme cylindrique ou de bocal (fig. 53). Une des feuilles d'étain se trouve en dehors du bocal; on la nomme armure extérieure de la bouteille de Leyde, l'autre se trouve en dedans; on la nomme l'armure intérieure. Cette dernière reçoit l'électricité au moyen d'une tige métallique terminée extérieurement par un bouton et intérieurement par un pinceau de fils métalliques, qui, divergeant en vertu de leur élasticité, se trouvent ainsi en contact avec le métal de l'armure. La tige est fixée au moyen d'un bouchon de bois ou de liége qu'elle traverse à frottement juste et qui est lui-même solidement inséré dans le goulot de la bouteille; une couche épaisse de cire recouvre le bouchon et la partie extérieure du verre qui l'avoisine afin d'empêcher toute réunion possible entre l'électricité de l'armure extérieure et celle de l'armure intérieure ou de la tige qui communique avec elle. Pour charger la bouteille, on la tient à la main par l'armure extérieure, et on présente le bouton au conducteur de la machine électrique. L'électricité positive de la machine pénètre jusqu'à l'armure intérieure, décompose à travers le verre l'électricité naturelle de l'armure extérieure dont la positive va dans le sol à travers la main et le corps de l'observateur et dont la négative est dissimulée. Pour opérer la décharge, on réunit par un excitateur l'armure extérieure (fig. 53), et le bouton qui communique avec l'armure intérieure. Quand on a déchargé la bouteille, il reste une petite quantité d'électricité libre sur l'armure intérieure ainsi que l'indique un électroscope. Si on la soutire avec le doigt après avoir eu soin de placer la bouteille sur un support isolant, elle se manifeste sous la forme d'une petite étincelle, et une fois qu'elle est partie, les boules de l'électroscope retombent tandis que l'électroscope mis en communication avec



Fig. 53.

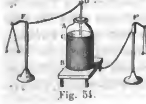


Fig. 54.

l'armure extérieure indique la présence d'une électricité négative libre sur cette armure (fig. 54).

On peut mettre en évidence les électricités libres de nature contraires que possèdent alternativement les deux armures en plaçant entre les deux boutons avec lesquels chacune d'elles communique, la balle de sureau d'un pendule électrique; attirée par l'électricité libre de l'un des boutons, cette balle vient en contact avec lui et s'électrise par ce contact; aussitôt repoussée elle va à l'autre chargé d'une électricité libre de nature contraire; elle y perd sa propre électricité et se charge de celle de ce second bouton par lequel, repoussée, elle retourne au premier, et ainsi de suite (fig. 55). La balle exécute ainsi entre les deux boutons une série d'oscillations qui peuvent se prolonger pendant plusieurs heures au bout desquelles les deux armures ayant perdu leur électricité par cette succession de très-petites décharges, le phénomène cesse. On donne quelquefois à la balle de sureau la forme d'une araignée dont elle est le corps et dont les pattes sont des petits fils très-fins de métal; c'est pourquoi on appelle cet appareil, l'*araignée électrique*. Si au lieu d'employer la balle de moelle de sureau, on touche successivement avec le doigt les deux boutons de la bouteille, on parvient à la décharger par une série de petites étincelles provenant des portions d'électricité rendues alternativement libres sur chacune des armures; mais ce n'est qu'après avoir tiré un nombre d'étincelles très-considérable, qu'on parvient à décharger complétement la bouteille. Il est important dans cette expérience de prendre garde de ne jamais toucher en même temps les deux boutons de la bouteille, ce qui arriverait facilement si on faisait usage des deux mains; on servirait alors soi-même de lieu de réunion aux électricités accumulées sur les deux armures et on éprouverait une secousse violente et souvent dangereuse. C'est aussi dans le but

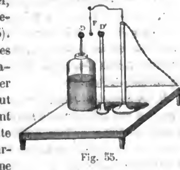


Fig. 55.

d'éviter cet inconvénient qu'il est essentiel de placer la bouteille de Leyde, lorsqu'elle est chargée, sur un tabouret isolant; car si on se borne à la placer sur une table ordinaire, on se trouve, au moment où l'on touche le bouton, sur la route que suivent pour se réunir les électricités des deux armures qui ne sont plus séparés que par des corps conducteurs.

M. Faraday pour montrer l'électricité différente dont sont chargées les deux armures d'une bouteille de Leyde, emploie deux cylindres concentriques faits avec une toile métallique, séparés par une couche d'air d'un centimètre environ d'épaisseur et reposant sur une base en résine; l'extérieur est mis en communication avec le sol pendant qu'on charge l'intérieur d'électricité; on les touche successivement avec le plan d'épreuve et on les trouve chargés, chacun, d'une électricité différente. Il faut avoir soin de toucher le cylindre extérieur sur sa surface extérieure.

Il est facile de charger d'électricité négative l'armure intérieure d'une bouteille de Leyde; il suffit pour cela de la tenir par le bouton et de faire arriver sur l'armure extérieure l'électricité de la machine; mais c'est encore dans ce cas qu'il faut avoir soin, après que la bouteille est chargée, de la poser sur un support isolant, car si en la tenant par le bouton on la plaçait sur une table, on recevrait toute la décharge.

Une expérience assez élégante due à Lichtenberg et dite des *figures de Lichtenberg*, met en évidence sans électroscope et sous une forme immédiatement visible, la nature de l'électricité dont est chargée l'armure intérieure d'une bouteille. Cette expérience consiste à promener lentement sur un gâteau de résine le bouton d'une bouteille de Leyde dont on tient à la main l'armure extérieure; on peut même avec ce bouton tracer des figures. L'électricité libre de l'armure intérieure qui se renouvelle constamment à mesure qu'elle sort puisqu'on tient à la main l'autre armure, reste adhérente a tous les points du gâteau que le bouton a touchés. Si après avoir ainsi tracé des lignes avec le bouton d'une bouteille chargée intérieurement d'électricité positive, on en trace d'autres à côté avec le bouton d'une autre chargée d'électricité négative, on réussit à les

rendre visibles et distinctes les uns des autres en saupoudrant le gâteau d'une poudre formée par un mélange de soufre et de minium qui ont été triturés ensemble. On voit toutes les particules de soufre se porter sur les lignes positives et toutes celles de minium sur les négatives et y rester adhérentes lors même qu'on souffle ou qu'on secoue fortement le gâteau pour faire disparaître la portion de la poudre qui se trouve sur les parties de la surface que le bouton n'a pas touchées. L'effet que nous venons de décrire provient de ce que dans leur trituration mutuelle les molécules de soufre ont pris l'électricité négative et celles de minium la positive, ce qui fait que les premières se portent sur les traces positives et les secondes sur les négatives. Remarquons encore que le soufre forme autour de chacun des points électrisés positivement une petite aigrette tandis que sur les points négatifs le minium ne laisse qu'une tache circulaire. Ce phénomène qui établit une différence assez remarquable entre les deux électricités tient à une cause plus générale que nous étudierons plus tard.

La propriété que nous venons de reconnaître dans la résine de conserver adhérentes à la surface l'une et l'autre électricité n'appartient pas seulement à cette substance; toutes celles qui sont isolantes la possèdent à un degré plus ou moins prononcé. Nous avons déjà vu qu'elle existait dans le verre quand nous avons électrisé intérieurement un bocal de verre pour produire la danse des balles de sureau. Une bouteille de Leyde, dont les armures sont mobiles, en fournit une nouvelle preuve. Le bocal de verre a dans ce cas une forme évasée, soit conique ; l'armure intérieure est en fer-blanc et entre exactement dans le bocal, l'armure extérieure est également en fer-blanc et le bocal y entre exactement. On charge la bouteille comme à l'ordinaire; puis avec un manche de verre isolant, on enlève l'armure intérieure, on enlève ensuite le bocal de verre; les deux armures ainsi détachées ne manifestent aucun signe électrique. Les deux électricités sont en effet restées adhérentes au verre, la positive sur sa surface intérieure, la négative sur l'extérieure. On retrouve ces deux électricités en replaçant le bocal dans son armure extérieure et en remettant en dedans son

armure intérieure; la décharge entre les deux armures a lieu comme si elles n'avaient pas été dérangées.

Le fait que nous venons de signaler explique pourquoi une bouteille de Leyde conserve toujours de l'électricité après une première décharge; lors même que celle-ci a donné naissance à une forte étincelle, on peut en tirer une seconde décharge, beaucoup moins forte, il est vrai, que la première, mais cependant encore très-sensible et quelquefois même assez violente, si la bouteille est grande et a été fortement chargée. Cette seconde décharge provient de ce qu'une portion des deux électricités est restée adhérente au verre après la première décharge, malgré le contact de tous les points des deux surfaces du bocal avec les surfaces métalliques; mais la seconde décharge suffit ordinairement pour faire disparaître toutes les traces restantes.

Pour terminer les détails relatifs à la bouteille de Leyde, ajoutons quelques mots sur l'origine de son nom qui est lié à l'histoire de sa découverte. C'est en 1746 que trois physiciens réunis à Leyde, Musschenbroek, Allaman et Cuneus, ayant essayé d'introduire, au moyen d'une tige métallique, de l'électricité provenant d'une machine dans de l'eau renfermée dans un ballon (fig. 56), afin d'essayer, disaient-ils, d'emmagasiner cet agent, furent singulièrement effrayés, lorsque l'un d'eux, tenant le ballon à la main, reçut, en touchant la tige métallique plongée dans l'eau, une secousse des plus violentes. Cette expérience fit grand bruit; on en exagéra singulièrement les effets; des colporteurs qui se répandirent dans toute l'Europe gagnèrent leur vie à la répéter sous des formes diverses. L'appareil primitif dans lequel il est facile de voir que l'eau faisait office d'armure intérieure tandis que l'humidité, dont le verre est toujours recouvert, remplissait la fonction d'armure extérieure, fut bientôt perfectionné et amené à la forme actuelle qu'il a toujours conservée, et cela longtemps avant qu'on en eût trouvé la théorie.



Fig. 56.

§ 5. Batteries électriques.

De même que pour le condensateur, la quantité totale d'électricité qu'on peut accumuler sur une bouteille de Leyde avec une même source d'électricité, dépend de l'étendue de sa surface ou plutôt de la surface de ses armures. En effet, la charge n'arrive à sa limite que lorsque chacun des points de la surface de l'armure en communication avec la machine électrique a une quantité d'électricité libre dont la réaction est égale à celle de la machine. On a donc cherché à donner aux bouteilles de Leyde la plus grande surface possible; on en a construit qui ont jusqu'à 30 et 40 centimètres de diamètre sur 50 à 60 de hauteur. Mais ces grandes bouteilles, outre qu'elles sont d'un maniement peu commode et d'un coût assez dispendieux, à cause du prix élevé des bocaux de la dimension voulue, présentent l'inconvénient que le verre peut facilement se briser, si sa contexture n'est pas parfaitement homogène. Il suffit, en effet, qu'il ait quelque défaut et par conséquent une partie plus faible que le reste, pour que les deux électricités accumulées sur les deux armures, obéissant à la tendance puissante qui les porte l'une vers l'autre, se réunissent à travers ce point en brisant le verre. Il est donc préférable d'unir ensemble plusieurs bouteilles de grandeur médiocre en établissant une communication métallique entre toutes leurs armures intérieures et une autre semblable entre toutes leurs armures extérieures. C'est ce qui constitue une *batterie électrique* qu'il ne faut pas confondre, comme on voit avec une *batterie* soit *pile voltaïque*.

Chaque batterie se compose de quatre bouteilles ordinairement, quelquefois de neuf ou de douze (fig. 57). Les bouteilles sont placées dans une caisse doublée d'une feuille d'étain sur laquelle elles reposent et qui sert à établir une communication entre toutes les armures extérieures; les armures intérieures communiquent entre elles au moyen de petites tiges métalliques qui lient ensemble les boutons. La décharge s'opère

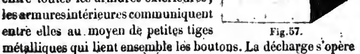


Fig.57.

par l'intermédiaire d'une chaîne ou d'un fil métallique fixé par une de ses extrémités à la feuille d'étain de la caisse et dont l'autre extrémité est approchée du bouton de l'une des bouteilles au moyen d'un manche isolant ou d'un excitateur. Il est facile de comprendre qu'on peut unir plusieurs batteries de manière à n'en former qu'une, comme on a uni plusieurs bouteilles pour faire une batterie.

Qu'il n'y ait qu'une ou qu'il y ait plusieurs batteries en expérience, c'est toujours une opération longue et pénible que de les charger; il faut pour cela avoir une bonne machine électrique et la faire agir au moins quelques minutes. On a imaginé d'accélérer l'opération en utilisant, pour la charge de chaque bouteille d'une batterie, l'électricité positive que l'induction développe dans l'armure extérieure des autres et qui ordinairement se perd dans le sol. On place dans ce but chaque bouteille de la batterie sur un support isolant et indépendant et on les dispose de façon que le bouton de chacune communique métalliquement au moyen d'une chaîne ou simplement par contact immédiat avec l'armure extérieure de la précédente (fig. 58). Le bouton de la première communique avec le con-

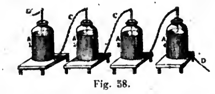
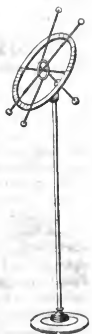


Fig. 58.

ducteur de la machine et l'armure extérieure de la dernière avec le sol. Il résulte de cet arrangement que l'électricité positive de l'armure extérieure de la première bouteille, au lieu d'être chassée dans le sol, sert à charger la seconde en pénétrant dans son armure intérieure; que l'électricité positive de l'armure extérieure de la seconde charge la troisième, et ainsi de suite jusqu'à la dernière, dont l'armure extérieure, communiquant avec le sol, y envoye l'électricité positive que l'induction y développe. On voit qu'on peut par ce mode, qu'on appelle *charge par cascade*, charger un nombre quelconque de bouteilles de Leyde avec la quantité d'électricité nécessaire pour en

charger une seule; mais quand les bouteilles sont chargées, il faut, pour accumuler l'effet de la décharge au même point, supprimer les communications établies entre l'armure extérieure et l'armure intérieure de chaque bouteille, ce qu'on fait, ou en enlevant avec un manche isolant les conducteurs qui établissent cette communication, ou en éloignant les bouteilles les unes des autres. Il faut, en outre, faire communiquer ensemble toutes les armures intérieures, ce qu'on fait également en disposant convenablement, au moyen d'un manche isolant, des tiges ou des fils conducteurs. On établit une communication semblable entre les armures extérieures, résultat qu'on peut également obtenir sans l'emploi de conducteurs, en rapprochant assez les bouteilles pour que leurs armures extérieures viennent en contact. On a alors une batterie chargée et prête à agir; il faut seulement mettre du soin et de l'adresse à faire ces divers arrangements, afin d'éviter de décharger les bouteilles et surtout de prendre soi-même la décharge.


Fig. 59.

Pour savoir le moment où, soit une bouteille de Leyde, soit une batterie, sont suffisamment chargées, on met l'armure intérieure en communication avec un électroscope à cadran, dont la tige mobile décrit un arc de cercle plus ou moins grand par l'effet de l'électricité libre que possède cette armure. En général, on cesse de faire arriver de l'électricité à l'armure intérieure quand son électricité libre est capable de faire décrire à la tige mobile de l'électroscope un angle de 45° à 50°, ou mieux encore quand on voit que cet angle n'augmente plus, preuve que la charge est parvenue à sa limite. On se sert avec avantage, dans ce genre d'expériences, de l'électromètre circulaire de Harris, qui repose sur le même principe que celui à cadran, mais qui est plus sensible et plus exact (fig. 59).

La divergence de l'électroscope, ne dépendant que de la quantité de l'électricité libre qui se trouve sur l'armure

intérieure, ne fournit aucune donnée sur l'intensité de la charge totale de la bouteille ou de la batterie; cette charge peut être mesurée au moyen de la distance plus ou moins grande à laquelle jaillit l'étincelle, entre le bouton de l'armure intérieure et un bouton semblable qui communique avec l'armure extérieure. L'appareil qui sert à préciser ces distances se nomme *électromètre de décharge de Lane* (fig. 60). Une branche de verre courbée part de la tige qui pénètre dans l'intérieur de la bouteille, et porte elle-même une tige horizontale terminée, à l'une de ses extrémités, par un bouton qui se trouve vis-à-vis et à peu de distance du bouton de l'armure intérieure et communiquant par son autre extrémité avec l'armure extérieure. On fait avancer graduellement cette tige horizontale jusqu'à ce que les deux boutons soient assez rapprochés pour que l'étincelle s'échappe entre eux. La distance à laquelle la décharge a lieu est ainsi appréciée très-exactement; mais il ne faut pas perdre de vue qu'elle doit dépendre non-seulement de l'intensité des électricités accumulées, mais aussi du degré d'humidité ou de raréfaction de l'air; et ce n'est qu'autant que ce dernier élément est constant, que le premier peut être évalué bien exactement. Il faut donc, autant que possible, lorsqu'on se sert de ce moyen pour comparer la puissance relative de différentes bouteilles de Leyde ou batteries électriques, opérer dans les mêmes circonstances atmosphériques.

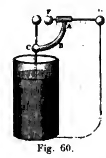


Fig. 60.

L'électromètre déchargeur de Cuthbertson est un appareil qui opère de lui-même la décharge quand la bouteille ou la batterie sont parvenues à la limite de leur charge. Un support isolant A porte une tige de métal D C formée, comme les deux bras du fléau d'une balance, de deux branches égales et mobiles autour d'un axe central. Ces deux branches, qui communiquent avec l'armure intérieure et avec un électromètre à cadran, se terminent l'une et l'autre par un bouton. Au-dessous du bouton de l'une des branches, mais à une distance suffisante pour que la décharge ne puisse pas avoir lieu, il en est un autre semblable E

placé à l'extrémité d'une tige métallique A' qui communique avec l'armure extérieure. Au-dessous également, mais très-près du bouton de l'autre branche, il en est aussi un autre D' placé à l'extrémité d'une tige métallique fixée au même support que la tige mobile, communiquant métalliquement avec elle, et par conséquent aussi avec l'armure intérieure. Lorsque la charge électrique de la bouteille ou de la batterie est arrivée à sa limite, la force répulsive que l'électricité libre de l'armure intérieure imprime aux deux boutons rapprochés qui communiquent l'un et l'autre avec elle éloigne le mobile D du fixe D', et rapproche par conséquent en même temps le bouton C de la branche opposée du bouton fixe E, qui communique avec l'armure extérieure. Ce rapprochement détermine la décharge au moment où il a réduit la distance qui sépare ces deux boutons à *la distance explosive* de l'appareil. On donne quelquefois à l'appareil une forme un peu différente, mais le principe de la construction est le même. La figure 61 les représente tous les deux.

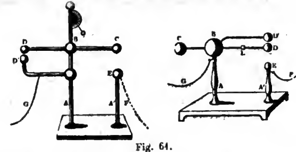
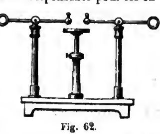


Fig. 61.

Enfin, un dernier appareil, qui est indispensable pour les expériences qu'on fait avec les batteries électriques, est le *déchargeur universel* de Henley (fig. 62). Il consiste en deux supports isolants de même hauteur et placés sur un même pied, à une distance de 25 à 30 centimètres l'un de l'autre. Chacun d'eux porte à son extrémité supérieure un genou auquel est fixé


Fig. 62.

un petit tube de métal dans lequel glisse à frottement juste une tige métallique. Les deux tiges peuvent ainsi être placées dans toutes les directions, et leurs extrémités, quand elles sont mises vis-à-vis l'une de l'autre, peuvent être éloignées à une distance quelconque. On place entre les extrémités opposées de ces deux tiges, en le posant sur un petit support qu'on peut élever à volonté, le corps qui doit être traversé par la décharge, morceau de bois, lame de verre, feuille métallique, etc., etc.; puis l'on fait communiquer l'une des tiges avec l'armure extérieure de la batterie, et on établit la communication de l'autre avec l'armure intérieure au moyen de l'excitateur à manches de verre ou de l'électromètre déchargeur de Cuthbertson.

§ 6. Quelques effets des bouteilles de Leyde et des batteries électriques.

Avant de terminer ce chapitre, nous décrirons quelques-uns des effets des plus remarquables qu'on peut produire avec la bouteille de Leyde et les batteries électriques, quoique les phénomènes qui résultent de la transmission des décharges électriques à travers divers milieux ne puissent être étudiés à fond que dans la quatrième partie de cet ouvrage.

La commotion qui avait si fortement frappé les physiciens de Leyde fut, immédiatement après la découverte de la bouteille, le phénomène qu'on étudia le plus. On remarqua qu'elle pouvait se transmettre à travers une file d'hommes formant la chaîne, c'est-à-dire se tenant par la main, et dont le premier prenait la bouteille par son armure extérieure, tandis que le dernier la touchait par le bouton; on soumit à cette épreuve tout un régiment rangé en bataille, qui, dit-on, fut renversé d'un seul coup. Dans cette expérience, on a observé que les hommes qui sont au milieu éprouvent un choc moins vif que ceux qui touchent la bouteille. Il ne faut employer dans les expériences de cette nature que la décharge d'une bouteille; une batterie serait dangereuse et pourrait occasionner de graves accidents. On a remarqué, en effet, qu'il ne faut pas des batteries très-fortes pour tuer des oiseaux, des lapins et même des animaux de plus grande taille.

Les effets calorifiques de la bouteille et des batteries sont nombreux et de nature bien différente. Ainsi avec la décharge d'une simple bouteille on enflamme facilement de l'éther, de l'alcool, du coton saupoudré d'un mélange de poudre de résine et de lycopode. Il faut pour cela que la substance inflammable soit placée dans une capsule en métal qui communique avec l'armure extérieure au moyen d'un fil ou d'une chaîne métallique, tandis qu'on approche le bouton de la substance elle-même. A une certaine distance, l'étincelle part et enflamme cette substance en la traversant, pourvu qu'elle ne forme pas une couche trop épaisse. On peut également enflammer la poudre à canon en la plaçant dans une cartouche de 4 à 5 millimètres de diamètre et de 40 à 50 de longueur dans laquelle on introduit, par ses deux bouts, des fils de fer qui aboutissent vers son milieu à une petite distance l'un de l'autre, et entre lesquels passe la décharge. Il arrive souvent que la poudre, si elle est fine, se disperse par l'effet de la décharge au lieu de s'enflammer. Pour éviter cet inconvénient, il faut placer sur la route de la décharge un tube plein d'eau ou de coton, ou du papier imprégné d'humidité. La présence de ce conducteur humide, en diminuant à ce qu'il paraît la vitesse et l'instantanéité de la décharge, lui donne le temps d'enflammer la poudre.

C'est également avec la décharge d'une batterie qu'on peut faire rougir, fondre et même enflammer des fils métalliques très-fins placés entre les deux extrémités opposées des tiges du déchargeur universel. La longueur qu'on peut donner à un même fil dépend de la force de la batterie. Si c'est un fil de fer, on le voit jaillir en petits globules fondus qui sont lancés au loin. Des fils d'étain donnent aussi lieu à un phénomène semblable, ou si la décharge est encore plus forte, ils disparaissent sous forme d'une poussière fine et blanchâtre semblable à une vapeur : c'est le résultat de l'oxydation de l'étain. L'or réduit en fils ou en lames très-minces est également comme volatilisé par une forte décharge ; du moins il s'élève dans l'air sous forme d'une vapeur rougeâtre. On se sert de cette propriété pour faire des empreintes électriques : on fait une découpure dans une carte, aux deux extrémités de laquelle est collée une bande

d'étain. On recouvre la découpure, d'un côté par une feuille d'or battu qui touche chacune des lames d'étain par un de ses bords, et de l'autre côté par un ruban de soie qui repose lui-même par son autre face sur un morceau de carton; la feuille d'or est également recouverte d'un carton; on place tout le système dans une presse pour bien assurer le contact. On fait ensuite passer la décharge de la batterie à travers la feuille d'or au moyen des deux bandes d'étain; l'or s'échauffe et s'oxyde; comme il ne peut s'échapper dans l'air, il passe à travers les jours de la découpure et produit sur le ruban une empreinte de couleur brun rougeâtre, très-régulière et qui reproduit l'image de la découpure (fig. 63).

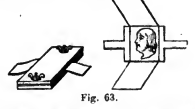


Fig. 63.

Les fortes décharges déterminent sur les masses métalliques des espèces d'anneaux colorés qui paraissent provenir de la haute température à laquelle est exposée la surface de ces métaux, à l'endroit où l'électricité les traverse. Priestley a fait une étude particulière de ces cercles de fusion, qu'il attribue à une liquéfaction partielle opérée par la chaleur.

Ce qui caractérise plus particulièrement les décharges des batteries électriques, ce sont leurs effets mécaniques ou moléculaires. Une lame de verre placée entre les deux bouts des tiges de l'excitateur est trouée par la décharge; il faut, pour empêcher que les électricités ne se réunissent en faisant le tour de la lame, dont la surface toujours plus ou moins humide est par là légèrement conductrice, que la portion à travers laquelle on veut faire passer la décharge soit entourée sur les deux faces d'un bourrelet de cire en forme d'anneau; une goutte d'huile mise au centre de l'anneau facilite aussi le succès de l'expérience. Un morceau de bois sec, une pierre, peuvent être également fendus en éclats par une décharge qui les tra-

verse. Une carte est percée également; mais si les extrémités des deux tiges qui amènent la décharge ne sont pas exactement vis-à-vis l'une de l'autre, le trou se fait vis-à-vis de la pointe qui apporte l'électricité négative. On remarque aussi que le trou présente des deux côtés également des bavures, comme si le fluide électrique était parti du milieu de la carte pour sortir par ses deux faces en même temps. Ce fait assez extraordinaire a beaucoup occupé les physiciens; il paraît tenir à ce que, comme nous le verrons, la décharge électrique ne se fait pas réellement par un mouvement de translation fini, mais bien par une série de petits mouvements vibratoires moléculaires.

L'air, quand il est traversé par une décharge électrique, éprouve une agitation très-marquée et une expansion instantanée si le phénomène se passe en vase clos. C'est ce qu'on peut constater au moyen du *thermomètre de Kinnersly* (fig. 64), qui se compose d'un tube en verre fermé à ses deux bouts et d'un tube latéral dans lequel s'élève un liquide qui donne la mesure de l'expansion. La décharge se fait entre deux boules métalliques qui pénètrent dans le tube.

Fig. 64.

Quant aux effets lumineux proprement dits, et qui ne sont pas dus à une simple incandescence des fils métalliques, ils se manifestent ordinairement sous la forme d'une étincelle, semblable, à l'intensité près qui est plus grande, à celle qu'on tire d'une machine électrique, et susceptible comme elle de présenter des apparences très-variées que nous étudierons plus tard. Nous nous bornerons à citer ici une jolie expérience qui consiste à faire passer la décharge d'une batterie à travers une chaîne métallique de plusieurs mètres de longueur, suspendue par des cordons de soie au plafond d'une chambre; au moment de la décharge, cette chaîne s'illumine dans toute sa longueur par l'effet des étincelles qui passent simultanément d'un chaînon à l'autre.

CHAPITRE V.

THÉORIES DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE; FAITS DIVERS QUI S'Y RATTACHENT; CORPS DIÉLECTRIQUES.

§ 1. Propriétés des deux fluides électriques.

Nous avons expliqué jusqu'à présent tous les phénomènes de l'électricité statique, en partant de la supposition que l'électricité se compose de deux fluides extrêmement subtils et impondérables, que les particules de chacun de ces fluides se repoussent mutuellement les unes les autres, tandis que celles de l'un des fluides attirent celles de l'autre. Les lois expérimentales que nous avions établies nous permettent maintenant de préciser mieux que nous ne l'avons fait les propriétés des deux fluides. Ainsi, attribuant aux fluides eux-mêmes la propriété que nous avons reconnue dans les corps qui les contiennent, nous pouvons admettre que la force avec laquelle les particules s'attirent et se repoussent est en raison inverse du carré de la distance qui les sépare. Nous devons également poser en principe que les corps à l'état naturel renferment une égale quantité de l'un et de l'autre fluide dans chacune de leurs particules, et que, s'ils ne peuvent exercer aucune action sur les corps environnants, c'est qu'*à la même distance le pouvoir attractif de l'un des fluides est égal au pouvoir répulsif de l'autre*. On peut démontrer exprimentalement ce principe en frottant ensemble deux plaques de verre, l'une polie, l'autre dépolie. On les approche d'un électroscope après les avoir frottées, mais sans les séparer, et on n'observe aucun effet; on les sépare, et on trouve alors sur la face dépolie de l'une des plaques une forte charge d'électricité négative, et sur la surface polie de l'autre, une forte dose d'électricité positive. Ces deux surfaces avaient été électrisées par leur frottement mutuel; l'une avait pris une certaine quantité d'électricité positive et l'autre une quantité égale de négative, mais la faculté isolante empêchait les deux élec-

tricités de se neutraliser, malgré le contact des deux faces; la nullité de l'action extérieure tant que le contact subsiste est donc la preuve que deux couches électriques, situées à une même distance d'un corps quelconque, exercent sur ce corps, si elles sont égales et de nature contraire, deux effets qui se neutralisent.

§ 2. Explication théorique de la distribution des fluides électriques à la surface des corps conducteurs isolés.

Le fait général établi par l'expérience, que l'électricité se porte entièrement à la surface d'un corps conducteur électrisé, est une conséquence naturelle de la répulsion mutuelle de toutes les particules du même fluide, et de la facilité qu'elles ont à se mouvoir dans le corps. Arrivées à la surface, elles s'y accumulent, et si elles ne la quittent pas, c'est qu'elles y sont retenues par l'air ou par les supports isolants qui s'opposent à la tendance qu'elles auraient à s'échapper en vertu de leur répulsion mutuelle. Elles y forment donc une couche excessivement mince, qui ne pénètre pas sensiblement en dedans de la surface du corps, car quelque mince que soit l'enveloppe métallique d'une sphère creuse, on n'y trouve jamais d'électricité en la touchant intérieurement. Quant à la couche, sa surface extérieure est évidemment la même que celle du corps; mais sa surface intérieure varie avec la forme du corps conducteur. Dans une sphère elle est semblable à l'extérieure, puisque tous les points ont la même charge électrique, tandis que dans les conducteurs non sphériques sur lesquels, comme nous l'avons vu, la distribution de l'électricité n'est jamais uniforme, on peut supposer qu'aux éléments de la surface les plus chargés correspond une couche, ou d'une épaisseur plus considérable, ou d'une densité plus grande. Comme des considérations d'un autre genre semblent prouver que les fluides électriques sont incompressibles, nous préférons admettre la première de ces deux hypothèses. Ainsi la couche électrique serait terminée à l'intérieur par une surface dont la forme serait légèrement différente de celle de la surface extérieure, du moins lorsqu'il s'agit

des corps non sphériques. Cette forme peut être établie *à priori* en partant de certains principes de mécanique, et des propriétés des fluides électriques définies et précisées comme nous l'avons fait. Voici comment :

La couche est en équilibre, car son état ne change pas, tant que le corps conserve son électricité et qu'il reste à l'abri de toute influence extérieure. La figure de la couche est donc celle qui résulte de l'équilibre des forces répulsives de toutes les molécules qui la composent, en les supposant soumises à la loi de l'inverse du carré. Ce n'est pas tout : il faut qu'elle soit telle que la couche n'exerce ni attraction ni répulsion, ou, en d'autres termes, aucune action, sur un point quelconque placé dans l'intérieur du corps. En effet, si elle exerçait une action, elle décomposerait l'électricité naturelle du point sur lequel elle agirait; cette électricité développée par influence réagirait à son tour sur celle du corps, et il y aurait changement dans son état électrique, ce qui n'a pas lieu, puisque l'introduction d'un nouveau corps dans l'intérieur d'un corps électrisé ne change nullement son état électrique. Ainsi l'équilibre ne peut subsister qu'autant que la résultante de toutes les forces répulsives sur un point intérieur est égale à zéro. Au moyen de ces conditions, on parvient à déterminer les rapports qui doivent exister entre les intensités des forces répulsives en divers points de la surface d'un corps conducteur électrisé, ou, ce qui revient au même, entre les épaisseurs de la couche électrique, et on obtient des résultats parfaitement d'accord avec ceux auxquels Coulomb est parvenu par l'expérience. On trouve de cette manière pour une sphère que la couche est terminée intérieurement par une surface sphérique, pour un ellipsoïde, qu'elle l'est par une surface ellipsoïdale dont le grand axe est à son petit axe dans un rapport un peu moindre qu'il ne l'est dans la surface extérieure, de manière que la couche va en augmentant d'épaisseur des extrémités du petit axe, où elle est à son minimum, aux extrémités du grand axe, où elle est à son maximum.

En appliquant l'analyse mathématique aux principes de mécanique et de physique que nous venons d'exposer, M. Poisson a réussi à déterminer *à priori* l'épaisseur de la couche électri-

que pour les différents points de la surface d'un corps conducteur d'une forme quelconque; il l'a fait également pour deux ou plusieurs corps en contact, ainsi que pour le cas où les corps sont, sans être en contact, soumis simplement à leur influence mutuelle. Il faut alors tenir compte de l'électricité développée par influence qui vient modifier l'état électrique de chaque corps; mais cette modification, qui a lieu à l'instant même où les corps sont mis en présence, n'empêche pas que, tant que ceux-ci ne changent pas de place, l'état électrique ne devienne permanent. Il faut encore, pour que cet état permanent ou cet équilibre subsiste, que la résultante des actions qu'exercent sur un point quelconque pris à l'intérieur les couches fluides qui les recouvrent soit égale à 0. Cette condition fournit dans chaque cas autant d'équations que l'on considère de corps conducteurs, et ces équations servent à déterminer l'épaisseur variable de la couche électrique sur les différents points de ce corps.

Il résulte de cette manière d'envisager les phénomènes de l'électricité statique, que le rôle d'un corps conducteur consiste uniquement à déterminer dans l'air pour le fluide électrique un vase dont il est pour ainsi dire lui-même le moule, et dont les parois sont la couche d'air qui l'enveloppe. Libre de cheminer dans ce vase, le fluide électrique se porte en entier vers les parois isolantes contre lesquelles il est retenu, en exerçant toutefois une pression du dedans au dehors à laquelle résiste la pression atmosphérique. Cette pression dépend à la fois du nombre des particules que renferme la couche, par conséquent de son épaisseur, et de la force répulsive exercée par les particules de la surface extérieure, force qui est elle-même proportionnelle à cette épaisseur. La pression est donc en raison composée de l'épaisseur de la couche et de la force répulsive de la surface ou proportionnelle au carré de l'épaisseur. Il résulte nécessairement de là que la pression du fluide électrique contre l'air peut, suivant la forme du corps de laquelle dépend l'épaisseur de la couche, être très-différente en un certain point de ce qu'elle est dans d'autres, et devenir même infinie en un point par rapport à celle que d'autres éprouvent. Il peut ainsi arriver que cette pression surpasse dans quelques parties du corps la

résistance que l'air lui oppose; alors l'air cède et le fluide s'écoule comme par une ouverture; c'est ce qui a lieu à l'extrémité des pointes et sur les arêtes vives des corps anguleux, car on démontre qu'au sommet d'un cône, la pression du fluide électrique deviendrait infinie si l'électricité pouvait s'y accumuler.

Il nous est impossible de donner une idée plus complète ici des travaux de M. Poisson, qui sont tout à fait du ressort des mathématiques pures. Nous nous bornerons à ajouter que M. Plana a repris une partie du sujet traité par M. Poisson, dans un mémoire sur la distribution de l'électricité à la surface de deux sphères conductrices isolées, publié à Turin en 1845; il a examiné les différents cas que le problème peut présenter, celui où les sphères sont en contact, celui où elles sont séparées par un intervalle quelconque, celui où cet intervalle qui les sépare est très-petit en comparaison de la distance de leurs deux centres. M. Plana a également démontré d'une manière plus rigoureuse certains principes admis sur les rapports entre l'épaisseur de la courbe électrique et les forces qui en émanent, ainsi que la théorie du plan d'épreuve à laquelle on avait fait des objections. Dans ce grand travail, fruit d'une analyse mathématique très-relevée, la masse de la matière électrique et la figure qu'elle affecte sont les seuls éléments pris en considération. Le calcul est complétement indépendant de la cause, quelle qu'elle soit, qui retient l'électricité libre à la surface des corps conducteurs. M. Plana, dans une note qui termine ses recherches, fait voir qu'on peut démontrer *à priori*, par le seul fait général que l'électricité libre se porte à la surface des corps conducteurs, que la loi de sa force répulsive doit être celle de la *raison inverse du carré de la distance*. Cette démonstration fort élégante, basée uniquement sur un résultat de l'observation, répond victorieusement aux objections de M. Harris contre la loi trouvée par Coulomb, du moins quand on la circonscrit au cas de simples points physiques, ainsi que nous l'avons dit.

§ 3. Explication théorique du mouvement des corps électrisés et moulinet électrique.

La répulsion et l'attraction des corps électrisés est une conséquence de la répulsion et de l'attraction qu'exercent l'un sur l'autre les deux fluides électriques. En effet, si les corps électrisés sont d'une nature isolante, les fluides ne pouvant se séparer des particules pondérables auxquelles ils sont unis, ils les entraînent avec eux dans leurs mouvements attractifs ou répulsifs, à moins que l'électricité ne soit trop faible ou les corps trop pesants pour obéir à ces actions. Mais si les deux corps sont conducteurs, si ce sont, par exemple, des balles de sureau, il faut recourir à la pression atmosphérique pour expliquer leurs mouvements. Puisque les deux balles ont la même électricité, aussitôt qu'on les approche l'une de l'autre, leurs électricités se repoussent, et pouvant librement cheminer, elles se portent dans les portions des balles les plus éloignées l'une de l'autre. Là elles forment chacune une couche, qui, agissant extérieurement en sens contraire de la pression atmosphérique, y diminue son effet, tandis que cette pression n'éprouve aucune résistance sur les portions intérieures de la surface de chaque balle de laquelle le fluide a été chassé. Plus pressées par l'atmosphère de dedans en dehors que de dehors en dedans, les deux balles s'écartent. Lorsqu'elles ont une électricité contraire, les deux électricités se portent, en vertu de leur attraction mutuelle, dans les portions de la surface de chaque balle les plus rapprochées l'une de l'autre, et y diminuent l'effet de la pression atmosphérique, qui, n'étant point combattue sur la partie extérieure des surfaces, pousse les deux balles l'une vers l'autre. On conçoit que la même explication s'applique au cas où il n'y a qu'une balle mobile vis-à-vis d'un corps électrisé fixe; elle s'applique également au cas où la balle mobile n'est pas électrisée, car, ainsi que nous l'avons déjà vu, elle est d'abord électrisée par influence, et l'action a lieu entre deux corps électrisés l'un et l'autre.

Enfin, il est un autre cas de mouvement dans les corps élec-

trisés que nous n'avons pas décrit encore et qui mérite une mention particulière, à cause de l'intérêt qu'il présente au point de vue théorique. C'est celui que réalise un petit appareil connu sous le nom de *moulinet électrique*.

Le moulinet électrique consiste dans une tige mince de métal dont les deux bouts sont appointés et recourbés en sens contraire, et qui est elle-même posée sur un pivot au moyen d'une chape fixée à son centre de gravité. On fait communiquer avec le pivot qui est isolé le conducteur d'une machine électrique, et dès que celle-ci est en activité, la tige prend un mouvement rapide de rotation, comme si les extrémités des pointes étaient vivement repoussées. Dans cette expérience, le fluide électrique répandu sur la surface des tiges du moulinet exerce partout une pression sur l'air environnant. S'il ne trouvait pas d'issue les pressions opposées étant toujours égales, l'appareil resterait en repos; mais il s'écoule par les pointes où il surmonte la pression atmosphérique, et comme il n'exerce plus alors de pression sur l'orifice de l'écoulement, la pression qui continue à s'exercer au point opposé détermine le mouvement par un véritable *recul*, analogue à celui que produisent par leur écoulement les liquides ou les gaz dans les machines à réaction. Nous reviendrons sur cette explication, qui n'est pas à l'abri de quelques objections, et nous verrons que l'expérience du moulinet électrique se rattache probablement à un phénomène plus général de l'électricité dynamique. On met le plus souvent quatre ou six branches au lieu de deux au moulinet électrique (fig. 65); on peut également varier la forme de l'expérience en faisant, par exemple, remonter, par l'effet de l'écoulement de l'électricité, le long de deux fils métalliques isolés, une tige terminée par deux pointes dirigées en sens contraires (fig. 66).

Fig. 65.

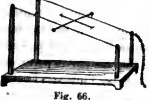


Fig. 66.

§ 4. Examen du rôle attribué à la pression atmosphérique dans les phénomènes de l'électricité statique.

Le rôle que la théorie fait jouer à la pression atmosphérique dans les phénomènes de l'électricité statique n'est pas à l'abri de toute objection; quelques faits que nous allons rapporter lui sont peu favorables. M. Becquerel a réussi à développer par frottement et à maintenir sous le vide, dans un électroscope à feuilles d'or, une quantité notable d'électricité. Quoique l'air eût été raréfié jusqu'à un millimètre de pression, les feuilles d'or restèrent divergentes, et conservèrent par conséquent de l'électricité libre pendant plus de deux jours. Il est bien difficile d'admettre que la petite quantité d'air demeurée dans le récipient eût pu exercer une pression suffisante pour produire cet effet.

Hauksbee et Grey avaient bien observé que les corps électrisés attirent les corps légers, aussi bien dans le vide que dans l'air; mais comme c'étaient des corps isolants, on ne peut rien en conclure de bien positif contre l'action de la pression atmosphérique, lorsqu'il s'agit de corps conducteurs. Il n'en est pas de même des expériences faites récemment par Harris. Ce physicien avait fixé une boule de cuivre, de 5 centimètres environ de diamètre, à l'extrémité d'une tige de métal isolée, et après l'avoir placée au centre d'un récipient l'avait mise par une autre tige en communication avec un électroscope; puis il donna à la boule une quantité d'électricité telle que la déviation de l'électroscope fut de 40°. Cette divergence se maintint lors même qu'on eut enlevé les 59/60 de l'air de la cloche. Le résultat fut semblable quand on eut placé l'électroscope lui-même sous la cloche et qu'on l'eut électrisé directement au moyen d'une tige métallique isolée qui communiquait avec l'extérieur. La divergence ne varia pas lors même qu'on eut réduit l'air aux 69/70 de sa densité primitive. Dans l'un et l'autre cas, les feuilles d'or de l'électroscope se rapprochaient graduellement quand on approchait une boule métallique isolée du corps électrisé, mais elles s'écartaient de nouveau quand on retirait la boule; c'était évidemment un

simple effet d'influence. Il faut, dans toutes ces expériences, que l'intérieur de la cloche soit bien desséché au moyen du chlorure de calcium ou de toute autre substance du même genre.

Les faits que nous venons de rapporter nous montrent que, si l'air retient l'électricité à la surface des corps, ce n'est pas en vertu de la pression qu'il y exerce, mais bien en vertu du pouvoir isolant qui dépend de sa nature même. L'air et les gaz agissent donc comme une couche isolante de résine ou de gomme laque; et comme dans le vide le plus parfait les corps retiennent encore à leur surface une couche d'air qui y reste adhérente, cette circonstance expliquerait comment il se fait que les phénomènes électriques se manifestent encore dans le vide. Il est vrai qu'ils n'y sont jamais aussi prononcés que dans l'air, et que l'électricité ne peut au delà d'une certaine intensité y être maintenue sur la surface des corps, mais ce serait simplement la preuve que le pouvoir isolant de l'air est moindre quand la couche gazeuse qui recouvre le corps est réduite à un grand degré de minceur, et que la densité de l'air qui est resté dans le récipient est diminuée. M. Harris a observé que les répulsions et les attractions entre les corps conducteurs électrisés ont lieu dans le vide comme dans l'air; nouvelle preuve de l'erreur qu'on commet en faisant jouer dans ces phénomènes un rôle à la pression atmosphérique. Ce fait par contre s'explique fort bien en admettant que les électricités sont retenues dans les portions des surfaces où elles se portent, par l'effet isolant de la couche d'air demeurée adjacente, et nullement par la pression atmosphérique; une fois retenues à la surface par l'effet de cette cause comme elles le seraient par une couche de vernis, elles ne peuvent plus obéir à leur attraction ou répulsion mutuelle qu'en entraînant avec elles les corps eux-mêmes, s'ils n'ont pas trop de masse. Cette explication, lors même qu'elle ne serait pas appuyée sur les observations faites dans le vide, nous semblerait en tout cas préférable à celle où l'on fait intervenir la pression atmosphérique, cette intervention étant implicitement fondée sur une idée purement hypothétique, celle que l'électricité est un fluide de même genre, à la ténuité près, que l'air et les gaz, et qu'elle agit d'une manière semblable.

Du reste, tout en croyant que les effets électriques observés dans le vide ainsi que d'autres non moins curieux dont nous parlerons plus tard, tiennent à la couche d'air demeurée adhérente à la surface des corps, nous ne voulons nullement prétendre que les corps conducteurs n'aient pas par eux-mêmes la faculté de conserver, ou mieux, de *coërcer* à leur surface une certaine dose d'électricité, faible il est vrai, mais cependant sensible. C'est un point délicat sur lequel nous aurons l'occasion de revenir plus tard, quand nous étudierons le rôle des gaz et du vide dans le phénomène de la propagation de l'électricité.

§ 5. Pouvoir inductif des corps diélectriques.

Si les théories que nous avons exposées semblent être en défaut en ce qui concerne le rôle qu'elles attribuent à la pression atmosphérique, elles sont attaquées maintenant par un autre genre de faits qui ne tend rien moins qu'à les renverser tout à fait en conduisant à la négation des actions à distance, et en les remplaçant par des actions au contact ou moléculaires. Avant d'exposer la théorie à laquelle ces faits ont conduit M. Faraday, étudions les faits eux-mêmes découverts par ce physicien; nous serons mieux placés pour apprécier en quoi ils doivent modifier, s'ils ne les renversent pas complétement, les théories basées sur les travaux de Coulomb et de Poisson.

Quand un corps électrisé agit par influence sur un corps conducteur, il existe toujours entre les deux corps un milieu isolant ordinairement une couche d'air, quelquefois une lame de verre ou un plateau de résine. On n'avait jamais attribué à ce milieu d'autre rôle qu'un rôle passif, c'est-à-dire qu'on ne l'envisageait que sous le rapport de l'obstacle qu'il opposait à la réunion des électricités contraires des deux corps; la seule différence qu'on établissait entre les divers milieux était que les uns, doués d'une faculté isolante plus grande que les autres, permettaient d'approcher davantage l'un de l'autre les deux corps électrisés sans qu'il y eût décharge électrique entre eux. Quant à l'effet d'induction lui-même, on admettait qu'il ne dépendait que de la distance qui sépare les deux corps et nullement de la nature

du milieu interposé. M. Faraday a montré par une série d'expériences que les choses ne se passent point ainsi. Voici le fait fondamental qui sert de base à ses recherches :

Un disque A isolé est électrisé. Près de ce disque et à la même distance on place deux autres disques isolés qui lui sont semblables, l'un d'un côté que nous appellerons B, l'autre de l'autre côté que nous appellerons C. A agit par influence sur B et sur C, et si on fait communiquer ces deux derniers disques avec le sol, ils ne gardent que leur électricité négative qui est dissimulée par la positive de A. Si on approche B de A de manière qu'il en soit plus près que C, aussitôt on voit l'électroscope de B indiquer la présence d'un peu d'électricité positive et celui de C accuser celle d'une petite quantité d'électricité négative qui est devenue libre. Ce double effet provient de ce que, en diminuant la distance, on rend le pouvoir inducteur de A sur B plus grand qu'il n'était, d'où est résultée la décomposition d'une nouvelle quantité d'électricité dans B ; or comme la communication de B avec le sol a été interrompue, ce disque conserve l'électricité positive qu'a produite cette nouvelle décomposition, mais la négative attirée par la positive de A est dissimulée par elle ; il en résulte qu'une plus forte proportion de l'électricité de A étant employée à dissimuler celle de B, la proportion qui agit sur C devient moindre et par conséquent une partie de l'électricité négative qui était dissimulée auparavant devient libre. Jusqu'ici les phénomènes se passent exactement comme le veut la théorie; mais si, remettant les choses dans leur état primitif, c'est-à-dire les deux disques B et C *à la même distance* de A, on interpose entre A et B un disque de gomme laque, on produit le même effet que si l'on avait rapproché B de A, c'est-à-dire qu'on augmente l'induction de A sur B. La distance est cependant demeurée la même, ainsi que toutes les autres conditions de l'expérience; il n'y a d'autre changement que la substitution d'un disque de gomme laque à la couche d'air qu'il remplace. Si on interpose un disque de soufre on produit le même effet, mais à un degré plus grand encore. Ainsi les corps isolants ont une capacité inductrice propre, et, comme on le voit, celle de la gomme laque est plus grande que celle de l'air

et celle du soufre plus grande que celle de la gomme laque. M. Faraday, pour caractériser cette propriété, nomme *diélectriques* les corps qui en jouissent, par opposition aux corps conducteurs. En effet, l'interposition d'un corps conducteur produit un effet tout à fait contraire; si on interpose une lame métallique soit isolée, soit, mieux encore, communiquant avec le sol entre A et B, aussitôt B donne des signes d'électricité négative très-forte qui proviennent de ce que l'induction cessant d'agir sur elle, son électricité négative, qui était auparavant dissimulée, devient libre. C donne aussi des signes d'électricité négative parce que toute son électricité ne peut plus être dissimulée par A, à cause de la présence de la nouvelle lame métallique, et que, par conséquent, une partie devient libre. Ainsi, mettre un disque métallique entre A et B, cela revient à remplacer B par un autre disque plus rapproché de A qu'il ne l'était, et, par conséquent, à le soustraire à l'induction de A. On voit donc que l'effet qui résulte de l'interposition d'une lame conductrice n'a aucun rapport avec l'effet que produit celle d'un corps diélectrique.

Il s'agit maintenant de déterminer les capacités inductrices ou le pouvoir inductif relatif des différents corps diélectriques. M. Faraday s'est servi, dans ce but, d'une balance électrique de Coulomb ayant pour fil de torsion un fil de verre de 50 centimètres de longueur environ et doué d'une grande élasticité; à l'extrémité du levier mobile est une balle de sureau doré de 7 à 8 centimètres de diamètre. Le plan d'épreuve est une balle semblable. La substance soumise à l'épreuve est placée entre deux surfaces sphériques métalliques concentriques dont l'intérieure est munie d'une tige de métal qui est isolée de façon à ne point communiquer avec l'extérieure; cela forme une véritable bouteille de Leyde dont la substance diélectrique est la couche isolante et les surfaces sphériques sont les deux armures (fig. 67). On a un second appareil, parfaitement semblable


Fig. 67.

au premier, dans lequel l'air seul sert de couche isolante entre les deux surfaces sphériques. On commence par enlever du premier appareil le corps diélectrique, de sorte qu'ils ont tous les deux également l'air pour corps isolant. On donne à l'enveloppe sphérique intérieure une certaine charge d'électricité en faisant communiquer l'extérieure avec le sol, puis on détermine la réaction de l'électricité restée libre sur la surface intérieure en touchant avec le plan d'épreuve un bouton placé au bout de la tige qui communique avec elle. On trouve 250° pour l'angle de torsion; c'est ce que M. Faraday avait trouvé dans son expérience, qui est celle que nous prendrons pour exemple. On fait communiquer par leurs armures intérieures les deux appareils, puis on les sépare : on trouve, après la séparation, 120° degrés sur l'un et 124° sur l'autre, de sorte qu'on peut dire que l'électricité s'est partagée également entre eux, ce à quoi on devait s'attendre, puisqu'ils sont parfaitement semblables en tout point. On refait la même expérience après avoir substitué dans un des appareils une couche de gomme laque à la couche d'air. On commence par charger l'appareil à air comme précédemment, et on trouve 290° pour l'angle de torsion obtenu après le contact du plan d'épreuve; on établit la communication entre la surface intérieure de l'appareil à air et celle de l'appareil à gomme laque. Si ce dernier eût renfermé la couche d'air, comme dans la première expérience, on aurait trouvé après la séparation 145°, soit la moitié de 290°, sur l'armure intérieure de chaque appareil. Mais la substitution de la gomme laque à l'air change tous les résultats. On ne trouve que 114° pour la charge restée sur la surface intérieure de l'appareil à air et 113° pour la charge de la surface intérieure de l'autre. Or il est évident que celui à air n'ayant qu'une charge de 114° au lieu de 145° qu'il aurait dû avoir, cela vient de ce qu'une charge de 176°, différence entre la quantité totale 290°, 114° s'est portée sur l'appareil en gomme laque. On devrait donc trouver 176° au lieu de 113° dans ce dernier, et si on ne trouve que 113°, c'est que l'induction étant plus forte à travers la gomme laque qu'à travers l'air, une proportion plus considérable de l'électricité libre a été dissimulée; en effet, la quantité d'électricité mesurée par l'angle de

torsion qui est la quantité libre doit être d'autant moindre que le pouvoir inductif est plus considérable, ou, ce qui revient au même, ce pouvoir est inverse de la quantité restée libre. Ainsi, si on appelle 1 le pouvoir inductif d'une couche d'air et X celui d'une couche d'égale épaisseur de gomme laque, on aura, en se rappelant que les 113° de charge de l'expérience faite avec la couche isolante de gomme laque donneraient 176° avec une couche isolante d'air : $1 : X = 113 : 176$, d'où $X = \frac{176}{113} = 1,55$.

Faraday, pour vérifier ses résultats, a fait ensuite l'expérience inverse; il a commencé par charger l'appareil à gomme laque, puis l'a fait communiquer par les armures intérieures avec l'appareil à air. Il a trouvé dans ce cas que l'électricité libre dont chacun des deux appareils se trouvait chargé après leur séparation était plus forte que la moitié de la charge initiale du premier. Ce résultat prouve que la quantité d'électricité totale dont se charge dans les mêmes circonstances la surface intérieure de l'appareil à gomme laque est beaucoup plus considérable que celle dont se charge l'appareil à air, puisque le premier, en donnant au second une charge plus forte que la moitié de la charge que ce second aurait prise s'il avait été chargé directement, ne perd pas lui-même la moitié, mais seulement une proportion plus faible de sa propre charge. L'expérience faite de cette manière montre donc également que la gomme laque a un pouvoir inductif plus fort que l'air et elle donne le même résultat numérique pour le rapport de ces deux pouvoirs.

On a soumis à la même épreuve différents corps diélectriques en les comparant toujours à l'air; l'expérience sur chacun d'eux a été répétée plusieurs fois, et on a obtenu les résultats suivants :

Pouvoir inductif spécifique, celui de l'air étant 1.

Verre.	1,76
Gomme-laque.	2,00
Soufre.	2,24

Le résultat de 2, 0 obtenu pour la gomme laque est un peu différent de celui que nous avons trouvé plus haut; cela tient à ce

que dans l'expérience que nous avons rapportée la couche de gomme laque était moins épaisse que celle d'air à laquelle on la comparait. Faraday a trouvé qu'en supposant l'épaisseur la même, le pouvoir inductif de la gomme laque devait être 2 et non 1, 55.

M. Harris a complété les expériences de Faraday; il donnait à chaque substance la forme d'un disque de même épaisseur, et il le recouvrait sur chaque face d'un disque d'un diamètre moitié moindre, fait avec une feuille d'étain. C'étaient de véritables tableaux magiques avec des substances isolantes de nature différente. Il a dressé, en opérant ainsi, le tableau suivant du pouvoir inductif de ces substances :

Air.	1.00	Cire d'abeilles. . . .	1.86
Résine.	1.77	Verre.	1.90
Poix.	1.80	Gomme-laque. . . .	1.95

Faraday a trouvé parmi les liquides que ceux qui sont les meilleurs isolants, tels que la térébenthine et le naphte rectifié, ont une capacité inductive supérieure aussi à celle de l'air; mais il faut dans les expériences avec les liquides, n'opérer que sur ceux qui ne possèdent par eux-mêmes aucun pouvoir conducteur, propriété qui troublerait les résultats.

Les différents gaz ont tous été soumis également à l'expérience; on les a comparés deux à deux, en mettant l'un dans un appareil, l'autre dans le second appareil. Puis on a comparé également l'effet de l'air plus ou moins raréfié avec celui de l'air maintenu à la pression normale, celui de l'air maintenu à 0°, avec celui de l'air chauffé graduellement de 50° à 200°. On est parvenu à reconnaître, à la suite de ces expériences multipliées, que tous les gaz ont le même pouvoir et possèdent la même capacité inductive, et que les variations dans la pression ou dans la température et par conséquent dans la densité, ne produisent non plus aucun effet. Il arrive seulement que lorsque la raréfaction du gaz parvient à un certain point, la décharge s'opère entre les deux armures; mais jusqu'à ce moment-

là, il n'y a aucun changement dans sa propriété diélectrique. On peut même donner à l'appareil une charge assez faible pour que la décharge n'ait pas lieu, et on constate ainsi que, quel que soit le degré de raréfaction de l'air, sa capacité inductive reste la même.

§ 6. Polarisation des diélectriques et théorie moléculaire de l'induction.

Il résulte donc des expériences que nous venons de rapporter, que la nature du milieu isolant ou *coïbent*[1] à travers lequel l'induction s'opère, exerce une influence marquée sur le phénomène, et que ce nouvel élément doit être ajouté à ceux qu'on savait déjà influer sur son intensité, tels que la grandeur de la charge électrique, la distance du corps induit et celle du corps inducteur. C'est un effet qui tient à une action propre des corps; mais quelle est cette action? Faraday admet qu'elle consiste dans la génération de couches moléculaires alternativement négatives et positives qui se succèdent dans le diélectrique et qui constituent ce qu'il appelle sa *polarisation*. Cependant, quelques faits observés déjà par Beccaria et d'autres physiciens et étudiés de plus près par Faraday lui-même, en montrant que les charges électriques peuvent pénétrer jusqu'à une certaine profondeur dans les coïbents eux-mêmes, semblent peu favorables à cette hypothèse. Ainsi, deux disques de spermaceti, soit de blanc de baleine, après avoir été mis l'un sur l'autre furent armés de lames métalliques de manière à faire un tableau magique. Le système fut électrisé, puis déchargé; et les deux disques de spermaceti ayant été séparés, on trouva que celui sur lequel était placée l'armure positive, avait de l'électricité positive et que l'autre était négatif comme l'armure qui le recouvrait. Cette expérience prouvait d'une manière évidente le fait de la pénétration; il est vrai de dire que le blanc de baleine n'est pas un isolant parfait et que cette circonstance peut expliquer jusqu'à

[1] Nous emploierons souvent ce mot qui exprime mieux l'idée d'un corps qui agit d'une certaine manière sur l'électricité, que le mot isolant qui n'indique qu'un état passif ou négatif.

un certain point comment les deux électricités, fortement attirées l'une vers l'autre, l'ont pénétré en partie.

Nous avons déjà vu dans le fait de la possibilité d'enlever les deux armures d'une bouteille de Leyde sans la décharger, la preuve de l'adhérence ou de la pénétration dans le verre des électricités que possèdent les corps en contact avec lui ; nous pouvons tirer la même conclusion en ce qui concerne la résine, de l'expérience des figures de Lichtemberg. Toutefois, ces faits en démontrant que l'électricité accumulée sur la surface d'un corps isolant peut y pénétrer jusqu'à une certaine profondeur plus ou moins considérable, suivant la nature de ce corps, ne sont pas concluants contre la possibilité de sa polarisation.

Voici, par contre, une expérience de M. Matteucci qui semble prouver d'une manière positive la polarisation des coïbents. Plusieurs lames très-minces de mica sont superposées et fortement pressées ; on applique sur les deux faces opposées de cette espèce de pile, deux armures d'étain, de manière à en faire un tableau magique. Après l'avoir chargé, on enlève les armures avec un manche isolant, puis on détache successivement les unes des autres les diverses lames de mica. On trouve que chacune d'elles a l'une de ses faces positive et l'autre négative, la face en contact avec l'armure positive étant positive, et celle qui a été en contact avec l'armure négative étant négative. L'intensité des charges électriques va en diminuant des lames extrêmes où elles sont à leur maximum, aux lames du milieu où elles sont à leur minimum, cette différence tient peut-être à ce que les surfaces des lames se trouvent être plus grandes aux extrémités qu'au centre du système. Il faut avoir soin, en séparant les lames les unes des autres, d'éviter tout frottement ; on s'assure directement que le simple fait de les détacher ne les constitue pas dans un état électrique. La polarisation des corps isolants soit coïbents, semble être prouvée par l'expérience que nous venons de rapporter et elle peut avoir également lieu lors même que leur pouvoir isolant n'est pas assez fort pour empêcher qu'ils soient pénétrés jusqu'à une certaine profondeur par l'électricité d'une armure appliquée sur leur surface.

M. Faraday, partant du principe que tous les corps isolants

sont susceptibles d'être polarisés, en déduit la conséquence que c'est par leur intermédiaire que s'operent tous les phénomènes de l'induction et qu'il n'y a point d'action à distance, ou tout au moins à une distance plus grande que celle qui sépare deux molécules qui se suivent immédiatement. Le plus ordinairement, c'est l'air dont les particules sont polarisées, comme le sont les lames de mica dans l'expérience précédente, qui transmet d'un corps électrisé à un qui ne l'est pas l'effet inductif du premier. Ce peut être également un autre gaz ou un corps isolant quelconque, mais alors l'effet se transmet plus ou moins bien suivant le pouvoir inductif du corps. Cette manière d'envisager les phénomènes diffère essentiellement de celle que nous avons adoptée jusqu'ici, en ce que dans cette dernière les corps isolants soit coïbents, ne jouent qu'un rôle passif qui consiste uniquement à empêcher la réunion des électricités opposées sans qu'eux-mêmes éprouvent aucune modification dans l'état électrique de leur masse.

Pour rendre visible la polarisation moléculaire des particules contiguës d'un corps diélectrique, qui ne peut l'être lorsqu'il s'agit de l'air, on se sert de l'essence de térébenthine dans laquelle on a placé des filaments de soie de trois à quatre millimètres de longueur. Le fond du vase dans lequel est l'essence, est en métal et communique avec le conducteur chargé d'une machine électrique; aucun effet ne se manifeste jusqu'au moment où l'on approche de la surface du liquide un conducteur qu'on tient à la main. Mais on voit au moment où cette approche a lieu, les filaments de soie se dresser de toutes parts et se réunir bout à bout de manière à former une chaîne non interrompue entre le fond métallique et le conducteur extérieur vers lequel ils tendent sans le toucher.

Ces particules adhèrent fortement les unes aux autres, ainsi qu'on peut s'en assurer en les touchant avec un tube de verre; mais aussitôt qu'on a déchargé le conducteur de la machine, elles tombent et vont au fond du vase. Les filaments de soie représentent les particules de l'essence dans laquelle ils flottent, et l'état polaire qu'ils prennent est semblable à celui des conducteurs isolés les uns des autres et placés dans les mêmes cir-

constances. A la place des filaments de soie, on peut mettre dans le vase de la poudre de sucre dont les particules forment également une chaîne qui indique leur état polaire. On y a mis encore de petites particules d'or battu qui s'arrangent de même, mais qui, vu leur nature conductrice, se déchargent les uns les autres, comme l'indiquent de petites étincelles qu'on voit briller entre elles.

Si l'on considère l'ensemble d'un diélectrique placé près d'un corps électrisé, on remarquera que chacune de ses particules doit, d'après la théorie qui précède, être en rapport actif, non-seulement avec les particules qui la précèdent, mais encore avec toutes celles qui l'entourent dans toutes les directions; il en résulte une diffusion des forces en tout sens, et les lignes de l'action inductrice suivant lesquelles s'opère la polarisation quand elles ne rencontrent pas d'obstacle, tendent à se propager de chaque particule comme d'un centre; elles peuvent même prendre une direction curviligne quand quelque obstacle s'oppose à leur libre propagation.

Faraday a essayé de vérifier l'exactitude de cette dernière conséquence en prouvant directement par l'expérience que l'induction pouvait s'exercer en ligne courbe. Il a pris dans ce but un cylindre de gomme laque de 15 à 18 centimètres de longueur et de 2 à 3 de diamètre. Il l'a fixé verticalement sur un pied en bois et a placé sur son extrémité supérieure rendue concave dans ce but une sphère métallique d'un diamètre égal au moins à celui des cylindres. Puis ayant frotté la gomme laque avec une flanelle chaude pour l'électriser, sans toucher le conducteur il a touché avec le plan d'épreuve les divers points de la sphère métallique électrisée par l'influence de l'électricité négative de la gomme laque. Le plan d'épreuve s'est chargé toujours de l'électricité positive en quelque point de la surface du conducteur qu'on l'ait placé, preuve qu'aucune partie de ce conducteur ne prend à la gomme laque par communication son électricité négative, et que c'est bien par induction qu'il est partout électrisé. Il faut toujours avoir soin de toucher le plan d'épreuve pendant qu'il est en contact avec la surface sphérique; mais, suivant les points de cette surface avec lesquels on le met

en contact, il prend une charge plus ou moins forte. Ainsi, si l'on touche la partie sphérique très-près du cylindre sur lequel elle est placée, il y a une charge de 512°; en la touchant au sommet, la charge n'est plus que de 130°, et elle est de 270° si le contact a lieu à un point également distant du sommet et du point même où la sphère repose sur le cylindre de gomme laque. Ces différences dans l'intensité de l'électricité induite aux différents points de la sphère ne pouvant, suivant M. Faraday, s'expliquer qu'en admettant que l'induction ayant lieu par l'intermédiaire des particules d'air, elle est nécessairement plus faible aux points sur lesquels elle ne peut s'exercer que suivant des lignes courbes, tels que le sommet et les parties environnantes, qu'aux points plus rapprochés sur lesquels elle s'exerce suivant des lignes droites ou d'une courbure très-faible.

On obtient des résultats analogues et encore plus frappants en plaçant sur le cylindre, au lieu d'une sphère, une demi-sphère ou un disque métallique dont le diamètre soit plus grand que celui du cylindre (au moins le double). Si l'on touche les différents points de la demi-sphère avec le plan d'épreuve, on trouve que la charge qu'il prend est moindre sur les points de la surface plane circulaire qui le termine supérieurement que sur les parties latérales de la surface courbe, et qu'elle est au minimum au centre de cette surface plane. Mais si on élève le plan d'épreuve lui-même verticalement au-dessus de ce centre, la charge induite qu'il prend devient plus considérable jusqu'à une certaine hauteur, à partir de laquelle elle décroît. Quand c'est un disque qui est placé sur le cylindre de gomme laque, on n'obtient aucun signe d'électricité induite en le touchant à son centre, tandis que le plan d'épreuve s'électrise par induction si on l'élève au-dessus de ce centre.

Il résulte de ces diverses expériences, et surtout de la dernière, que l'induction ne se fait pas à travers le métal, qu'elle s'opère donc par l'intermédiaire des molécules d'air et suivant des lignes qui, partant des divers points du cylindre de gomme laque, se courbent plus ou moins autour de la sphère, de la demi-sphère ou du disque, pour arriver jusqu'au point où le plan étant au centre même du disque, la courbure de

la ligne d'induction est trop forte pour que l'induction puisse s'y propager.

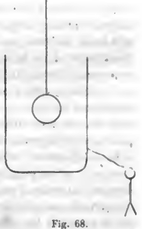
Les effets demeurent les mêmes quand le corps métallique qui repose sur le cylindre de gomme laque communique avec le sol par l'intermédiaire d'un fil de métal qui passe à travers l'axe du cylindre. Par contre, si on entoure entièrement la gomme laque d'une enveloppe métallique communiquant avec le sol, tous les effets cessent d'avoir lieu.

Sans nous dissimuler l'importance des expériences qui précèdent, nous ne pouvons pas cependant les regarder comme conduisant nécessairement à la conclusion que leur auteur en tire, savoir que l'induction s'opère par l'intermédiaire des particules d'air disposées suivant des lignes courbes ou droites. En effet, il ne serait pas impossible, ce nous semble, d'expliquer par les théories reçues de l'induction, et en nous basant sur les principes que nous avons établis dans les premiers chapitres de cette seconde partie, l'état électrique des surfaces métalliques placées sur le cylindre de gomme laque tel que les accuse le plan d'épreuve. Nous reconnaissons cependant qu'il y a un point nouveau acquis à la science, c'est celui de la polarisation du corps isolant. A cet égard, les premières expériences de Faraday et celles de Matteucci, que nous avons rapportées plus haut, l'établissent d'une manière positive, sinon pour l'air et les gaz, du moins pour les solides et les liquides. Quant à l'air et aux gaz, nous trouverons dans des phénomènes d'un autre ordre, savoir ceux qui sont relatifs aux décharges, une démonstration, sinon directe, du moins assez probante, de l'existence chez eux de cette polarisation.

§ 7. Théorie générale de Faraday sur l'électricité statique.

Partant des faits qui précèdent, M. Faraday pose en principe qu'un état électrique absolu, soit positif, soit négatif, ne peut pas exister dans un corps, mais que tout corps électrisé trouve toujours près de lui, soit dans les corps isolants, soit dans les corps conducteurs dont il est entouré, un état électrique contraire au sien; ce qui fait de l'induction un phénomène général.

Cette condition générale, à laquelle sont soumis tous les phénomènes électriques, a une grande analogie avec le fait de l'action et de la réaction des corps élastiques. Ainsi un ressort d'acier nous présente l'exemple d'un corps susceptible de susciter une force dès qu'un agent extérieur la met en évidence. La condition à laquelle l'action du ressort doit obéir, c'est de s'exercer au même degré dans deux directions opposées. Si nous comprimons ou si nous étendons le ressort, nous sentons son action et sa réaction, non-seulement nous constatons ainsi l'existence de deux forces opposées à ses deux extrémités, dont l'une peut être regardée comme positive, l'autre comme négative, mais nous apercevons que chaque section intermédiaire de la spirale est dans un état semblable d'action et de réaction, ou, ce qui revient au même, dans une espèce d'état polaire. En estimant la somme des forces, nous la mesurons dans une certaine direction, et nous admettons forcément que la somme de ces forces dans la direction opposée est égale à la première. Il en doit être de même pour l'électricité. Tous les phénomènes des électricités positive et négative peuvent probablement être expliqués par l'action et la réaction d'une force capable d'être manifestée, à divers degrés, dans différentes substances, plus simplement que par l'hypothèse des fluides impondérables. Les deux forces opposées de l'électricité ressemblent en fait à l'action et à la réaction en ce qu'elles s'accompagnent toujours.


Fig. 68.

Voici une expérience qui montre qu'en effet l'électricité développée par induction est contraire et parfaitement égale en intensité à celle qui la développe. Une boule isolée et électrisée est placée dans l'intérieur d'un bocal cylindrique dont les dimensions sont très-grandes par rapport à celles de la boule (fig. 68). Le bocal communique avec un électroscope à feuilles d'or qui diverge aussitôt que la boule électrisée est intro-

duite intérieurement; on fait toucher le bocal par la boule; celle-ci perd son électricité, et l'électroscope ne diverge ni plus ni moins qu'avant. Cette expérience prouve que l'électricité qui est induite par la boule et celle qu'elle possède sont exactement équivalentes en quantité et en puissance. Quelle que soit la position de la boule dans l'intérieur du bocal, qu'elle soit plus ou moins rapprochée du fond ou des côtés, la divergence de l'électroscope est la même. Au lieu d'un seul bocal on peut en placer trois ou quatre concentriques, isolés les uns des autres par des plaques de gomme laque qui séparent le fond de chacun d'eux du fond du bocal suivant (fig. 69), l'électroscope communiquant toujours avec la surface extérieure du bocal extérieur; l'effet est exactement le même que lorsqu'il n'y avait qu'un seul bocal; il est encore le même si les quatre bocaux communiquent entre eux métalliquement. Lorsqu'on introduit à la place des bocaux intérieurs un bocal de gomme laque et de soufre, en laissant toujours un bocal métallique extérieurement et la boule électrisée au centre, il n'en résulte pas le moindre changement dans la divergence des feuilles d'or de l'électroscope du bocal extérieur. On voit donc par cette expérience que le principe posé plus haut de l'égalité des deux forces qui constituent les deux électricités est général, car il se vérifie dans des cas bien différents, et notamment dans des diélectriques tels que la gomme laque et le soufre, d'un pouvoir inductif bien différent de celui de l'air. Une autre manière de démontrer le même principe, c'est d'introduire une petite sphère électrisée au centre d'une sphère creuse non électrisée et isolée. L'électricité que cette dernière prend par induction est, ainsi que le montrent les indications d'un électroscope, exactement égale à celle qu'elle prend par communication en étant mise en contact avec le petit globe intérieur qui est resté électrisé.

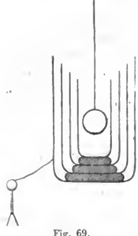


Fig. 69.

Appliquant ses idées théoriques aux autres phénomènes divers de l'électricité statique, Faraday est conduit à admettre que la tendance de l'électricité de se porter à la surface des corps conducteurs est plus apparente que réelle, et que les expériences qui constatent qu'il n'y a en effet d'électricité libre qu'à leur surface s'expliquent facilement d'une autre manière. Aucune charge électrique d'après sa théorie ne peut se manifester dans l'intérieur d'un corps à cause des directions opposées des électricités dans chacune des particules intérieures d'où résulte un effet nul; tandis que l'induction exercée par les corps extérieurs rend sensible l'électricité à la surface. D'après cette manière de voir, l'électricité doit se montrer seulement à la surface d'une enveloppe conductrice quelle que soit sa conductibilité ou la faculté isolante de la substance placée intérieurement. C'est ce que Faraday a en effet démontré en électrisant fortement de l'essence de térébenthine placée dans un vase de métal. Il n'y avait d'électricité apparente qu'à la surface extérieure du vase. Il a même construit une chambre cubique d'un mètre de côté dont les parois en bois étaient recouvertes extérieurement de feuilles de plomb; il l'a isolée, puis après y avoir introduit des électroscopes et autres objets il a électrisé l'air intérieur avec une forte machine. Aucune trace d'électricité ne s'est manifestée au dedans, tandis que des étincelles considérables et des aigrettes lumineuses partaient dans tous les sens de la surface extérieure. Ces expériences, en complétant celles de Coulomb dans lesquelles il ne s'agissait que de corps conducteurs, rendent peu probable l'explication qu'on en donnait vu qu'elle était basée sur la libre propagation de l'électricité dans la masse conductrice, d'où résultait que cette électricité se portait toute à la surface. Une fois que le phénomène a lieu de la même manière avec des corps isolants placés intérieurement cette explication n'est pas soutenable.

Quant à l'influence de la forme sur la quantité d'électricité accumulée à la surface des corps non sphériques, elle dépendrait toujours, d'après la théorie de Faraday, de ce que parmi les points de la surface, les uns seraient exposés à une somme plus grande de forces inductrices que les autres; ainsi les extrémités

d'un cylindre ou d'un ellipsoïde allongé seraient plus fortement électrisées que le reste de la surface parce qu'il en part un plus grand nombre de filets de particules polarisées établissant avec les conducteurs environnants la communication nécessaire pour l'induction. Une pointe est encore supérieure à cet égard, car elle est le centre d'où émanent dans toutes les directions les lignes de force inductive qui se trouvent, par exemple, lorsqu'il s'agit d'une boule, réparties sur une plus grande étendue et partir non pas d'un seul point, mais de tous les points de sa surface également.

Dans la théorie que nous venons d'exposer, la répulsion mutuelle des corps chargés de la même électricité n'est qu'apparente; elle provient de ce qu'il n'y a pas d'électricité sur les surfaces les plus rapprochées et de ce que chacun des deux corps est attiré dans des directions opposées par les corps conducteurs environnants chez lesquels l'induction détermine un état électrique dissemblable au leur. On peut en effet constater au moyen du plan d'épreuve que les deux feuilles d'or d'un électroscope n'ont, quand elles divergent, aucune charge électrique sur leur surface intérieure, tandis qu'elles sont fortement électrisées extérieurement, quelque minces qu'elles soient du reste. La répulsion est encore expliquée en l'attribuant à l'attraction exercée sur chacune des deux feuilles d'or par l'électricité contraire que l'induction a développée dans les couches d'air en contact avec leur surface extérieure. Ce mode d'action de l'air est bien plus naturel et plus probable que celui dans lequel on l'envisage comme déterminant la répulsion par la pression plus grande de dedans en dehors que de dehors en dedans qu'il exerce sur les corps électrisés. Toutefois, les expériences qui montrent que dans le vide la répulsion a lieu aussi bien que dans l'air, sembleraient être également contraires à ces deux explications; à moins que dans la première on n'admette l'effet par induction des corps ambiants lors même qu'ils sont placés à une grande distance.

Faraday ne s'est pas contenté de suivre les conséquences de sa théorie dans ce qui concerne les phénomènes de l'électricité statique; il les a également suivies dans les effets de l'électri-

cité dynamique où il en a fait les applications les plus heureuses. Il a étudié et classé les différents modes suivant lesquels s'opèrent les décharges entre les corps chargés d'une électricité différente. Il a fait voir en particulier que le retour à l'équilibre, sous le rapport électrique, des particules polarisées de corps diélectriques soit coïbents, constitue la décharge et est l'origine de la plupart des phénomènes qui l'accompagnent, tels en particulier que la rupture de ces corps. Il a montré que, quoique la capacité inductive ne soit nullement encore modifiée chez les gaz par une différence dans leur nature ou leur densité, la distance à laquelle la décharge avec étincelle peut s'opérer est extrêmement influencée par l'état physique du milieu comme par sa nature chimique. La densité en particulier influe en ce sens que la limite de la charge que peut prendre un corps conducteur isolé dépend du nombre des particules du diélectrique ambiant auxquelles cette charge doit être communiquée par induction; moins il y en a, plus on arrive promptement à la limite. Il paraît aussi qu'en nombre égal les particules éprouvent plus ou moins rapidement, suivant leur nature, les effets de l'induction. Mais ce sujet et tous les détails qui s'y rattachent seront traités dans la quatrième partie; nous ne nous y arrêterons pas davantage pour le moment.

Nous venons d'exposer la théorie de M. Faraday sur les phénomènes de l'électricité statique. Quoiqu'elle ait encore besoin d'être mieux précisée, elle mérite cependant déjà dans son état actuel d'attirer l'attention sérieuse des physiciens. Elle a en sa faveur d'établir, comme on le verra, un lien plus intime entre les phénomènes de l'électricité statique et ceux de l'électricité dynamique; elle semble reposer sur un principe juste, celui que les actions électriques ne se manifestent jamais que par l'intermédiaire des particules matérielles. Enfin elle tend à opérer un rapprochement remarquable entre les forces électriques et les autres forces de la nature. Déjà un savant mathématicien, M. Mossotti, a réussi, par l'application du calcul et des lois de la mécanique, à expliquer dans cette théorie d'une manière satisfaisante les lois trouvées par Coulomb et que Poisson avait rattachées à la théorie des deux fluides impondérables.

Toutefois nous ne saurions encore, tout en reconnaissant l'imperfection de cette dernière théorie, admettre complétement la nouvelle; en d'autres termes, nous ne saurions voir dans le fait incontestable que le milieu isolant qui sépare deux corps entre lesquels l'induction électrique s'exerce, modifie cette action, et est lui-même influencé par elle, la preuve démonstrative que l'induction s'exerce par son intermédiaire. Ne pourrait-il pas arriver que l'induction ayant déterminé à distance dans un corps un état électrique différent de celui qui existe dans le corps inducteur, ces deux électricités contraires modifiassent l'état électrique des particules interposées sur la ligne qui les sépare, comme à leur tour elles peuvent être modifiées par ces particules? Ce qui nous ferait pencher vers une explication de ce genre, c'est la difficulté de concevoir une puissance d'induction émanant indifféremment dans toutes les directions d'un corps électrisé comme une espèce de rayonnement, tandis que nous savons par expérience l'influence considérable qu'exerce sur la direction de cette émanation la présence d'un corps conducteur placé dans une certaine position. Il est vrai que Faraday et les partisans de sa théorie répondent à cette objection par l'expérience que nous avons citée plus haut, de la petite sphère électrisée placée au centre de la grande, et par quelques considérations tirées de la réaction que le corps conducteur exposé à l'influence d'un corps électrisé doit à son tour exercer sur ce corps. Mais nous ne croyons pas, malgré ces réponses, que le principe du rayonnement du pouvoir inducteur ayant lieu indifféremment en tout sens soit rigoureusement démontré. Les effets qui ont lieu dans le vide nous paraissent également, ainsi que nous l'avons déjà indiqué, une objection assez forte contre la théorie qui nie toute action à distance, à moins qu'on ne suppose que les particules qui restent dans le vide même le plus parfait suffisent pour expliquer les phénomènes qui s'y passent. Au reste le rôle encore obscur et curieux que joue le vide dans les phénomènes électriques sera également dans la quatrième partie l'objet d'un examen approfondi, car il est intimement lié avec les effets des décharges électriques.

Les objections que nous venons de présenter contre la théorie

de Faraday sont renforcées par des recherches récentes que vient de faire M. Matteucci, sur la propagation de l'électricité dans les corps solides isolants, et à la suite desquelles il est arrivé à des conclusions différentes de celles de Faraday sur le rôle de ces corps dans les phénomènes d'induction. Il a bien constaté que, dans les corps isolants, il se développe, en présence d'un corps électrique, un état électrique moléculaire d'après lequel chaque molécule du corps isolant a les deux états électriques contraires développés sur ses faces opposées. Cette électrisation moléculaire se manifeste à un degré différent dans les divers corps isolants. C'est ce qui fait, par exemple, que le soufre et la résine exercent un pouvoir attractif inégal sur un même pendule électrisé; de plus elle se développe ou cesse au moment même où la présence du corps électrisé commence ou cesse. Les états électriques moléculaires peuvent se détruire, et l'électricité se propager, soit à la surface, soit à l'intérieur des corps isolants; le pouvoir isolant consiste précisément dans la résistance plus ou moins grande opposée par des corps qui en sont doués à la destruction des états électriques moléculaires par l'entrée ou la sortie du fluide électrique des molécules mêmes; en tout cas l'électricité ne peut jamais pénétrer dans les molécules d'un corps isolant, sans avoir vaincu la force répulsive de l'électricité de même espèce qui se trouve sur ces molécules.

Toutes les expériences au moyen desquelles M. Matteucci est parvenu aux résultats que nous venons d'énumérer ont été faites au moyen d'appareils semblables à la balance de Coulomb, mais dont les détails de construction variaient avec le but particulier qu'il avait en vue. Il est facile, en particulier, de prouver la propagation de l'électricité dans l'intérieur d'un corps isolant. Un cylindre de stéarine ou un cylindre de soufre, mis en contact avec le conducteur de la machine électrique en activité, frottés ensuite sur leur surface, donnent des signes d'électricité négative; puis posés sur un conducteur, ils n'en donnent plus, et redonnent plus tard des signes d'électricité positive. Au reste, M. Faraday avait déjà constaté cette pénétration de l'électricité dans les corps isolants.

La première et la plus importante des expériences de M. Mat-

teucci est celle qu'il a faite avec des lames isolantes, fixées, au moyen de la cire d'Espagne, à des tiges de verre longues de 12 centimètres, et qu'il introduisait successivement, en les tenant par cette tige, dans l'intérieur de la cage d'une balance de Coulomb, dont les deux boules électrisées étaient divergentes.

La lame isolante était introduite de façon que son centre fût en contact avec la boule fixe, dont elle diminuait ainsi la réaction électrique au bout de quelques instants. Aussi, la boule en contact avec la lame, ayant perdu une certaine quantité d'électricité qui s'est répandue sur la lame, la force répulsive qui reste après le contact, comparée avec celle qui existait auparavant, doit donner, dans chaque cas, la mesure de l'électricité passée sur la lame isolante. Plusieurs expériences faites avec des lames de soufre ont montré que la perte la plus grande a lieu avec la lame la plus mince et qui a la moindre surface, tandis que, pendant que dure le contact, la force électrique est d'autant moindre que la masse de la lame isolante est plus considérable. C'est qu'il ne faut pas confondre cette dernière force avec celle qui reste après que le contact a eu lieu, laquelle peut être plus grande ou plus petite que la première.

En comparant les effets obtenus avec des lames de différente nature, on trouve des résultats très-variables avec le verre, qui est toujours plus ou moins hygrométrique, et par contre très-constants avec la gomme-laque et le soufre, qui produisent la même perte d'électricité sur une boule métallique électrisée qu'elles touchent. Une lame de verre recouverte d'une couche de vernis à la gomme-laque produit le même effet, pourvu que la couche ait 1/4 de millimètre d'épaisseur au moins. D'autres expériences ont été faites en mettant la lame entre deux charges électriques contraires, ou en d'autres termes, en se servant de lames de différente nature, comme couche isolante entre les deux armures d'un tableau magique. C'est en opérant d'une manière à peu près semblable que Faraday, puis Harris, après lui, avaient trouvé des différences entre les différents corps, quant à leur influence sur la charge des deux armures, et avaient déterminé leur pouvoir spécifique inducteur. M. Matteucci, croyant que ces différences ne sont dues qu'à des différences

dans la propagation de l'électricité, soit à la surface, soit à une très-petite profondeur dans l'intérieur des corps, a formé dans ce but une lame isolante, vide intérieurement, composée de lames de mica, réunies avec de la gomme-laque. Cette lame, de 25 centimètres carrés de surface, était comme une espèce de boîte; sa surface intérieure était recouverte d'une couche de gomme-laque de 2 millimètres 1/2 d'épaisseur : elle se composait donc en fait d'une couche d'air de 10 millimètres d'épaisseur interposée entre deux lames de mica, couvertes de gomme-laque. Après avoir opéré avec cette lame, M. Matteucci y a introduit du soufre fondu, qui formait ainsi une couche de soufre de 10 millimètres d'épaisseur, substituée à la couche d'air. Les résultats ont été exactement les mêmes dans les deux cas. Ils ont été aussi les mêmes avec une lame de soufre, avec une lame de flint-glass recouverte d'une couche de soufre, épaisse de 2 millimètres avec une lame de gomme-laque recouverte d'une couche de soufre d'un 1/2 millimètre d'épaisseur.

Tous ces résultats semblent prouver que les différences trouvées par quelques physiciens, avec des lames isolantes de différente nature employées pour former des tableaux magiques, ne sont pas dues à un pouvoir inducteur spécifique. En effet, on voit qu'une certaine lame isolante produit les mêmes effets qu'une autre différente, pourvu que la surface de la première lame soit formée d'une couche de la même matière isolante que celle qui compose la totalité de la seconde; mais il faut que la couche ajoutée ait une certaine épaisseur pour que son effet soit semblable à celui d'une lame formée tout entière de la même substance que cette couche. C'est donc à des différences dans la propagation de l'électricité, soit à la surface, soit dans l'intérieur des différents corps isolants, qu'il faudrait recourir, pour expliquer les phénomènes observés par Faraday et par Harris. Reconnaissons donc que le sujet mérite d'être encore étudié, mais que toutefois il résulte déjà, de toutes les expériences, un point important acquis à la science, savoir le fait de la polarisation moléculaire dans les corps isolants, mode probable de propagation de l'électricité dans les corps conducteurs également.

§ 8. Théorie d'un seul fluide de Franklin.

Nous n'avons point parlé dans ce chapitre d'une théorie qui, par son apparente simplicité et le nom de son auteur, a joui pendant quelques années d'une grande faveur; c'est la théorie d'un seul fluide de Franklin. Ce fluide unique possède exactement toutes les propriétés qu'on attribue dans la théorie des deux fluides à chacun d'eux considéré isolément. Il est composé de particules infiniment ténues, qui se repoussent toutes avec une force inverse du carré de la distance.

Dans la théorie d'un seul fluide, chaque corps renferme à l'état naturel une certaine proportion de ce fluide. Si, dans un corps donné, on en accumule une proportion plus forte, on l'électrise *en plus*, soit *positivement;* si au contraire on diminue la proportion qu'il doit en contenir, on l'électrise *en moins* ou *négativement*. Tant que l'état naturel subsiste, aucune manifestation n'a lieu, mais dès que l'état devient positif ou négatif, alors il y a action électrique. Il faut admettre encore qu'il y a attraction entre la matière pondérable et le fluide électrique impondérable, en sorte que lorsque deux corps sont en présence, plusieurs forces sont en lutte, qui doivent, suivant leurs intensités relatives, déterminer l'attraction, la répulsion ou l'équilibre. Ce sont, la force répulsive des fluides électriques que les deux corps possèdent, l'attraction entre le fluide électrique de l'un et la matière de l'autre, enfin l'action mutuelle des particules impondérables de l'un des corps sur celles de l'autre. Æpinus, en soumettant cette théorie au calcul, a été conduit à la singulière conséquence que, pour expliquer la répulsion de deux corps électrisés négativement, il faudrait admettre que l'action mutuelle des particules de la matière est répulsive au lieu d'être attractive. Ce résultat, si contraire aux idées admises depuis Newton, a dû faire renoncer à la théorie qui y avait amené. D'ailleurs, l'antagonisme si prononcé et si constant qu'on retrouve toujours entre deux principes opposés dans les phénomènes électriques ne peut s'expliquer que par l'existence de deux fluides différents, ou, ce qui revient au même, de deux modifications différentes du même fluide. Quelles sont ces mo-

difications ? quel est ce fluide qui est susceptible de les éprouver ? Voilà, nous en convenons, des questions qui ne sont point résolues, et nous sommes loin de présenter la théorie des deux fluides telle que nous l'avons exposée comme le dernier mot de la science. Elle n'est pour nous qu'un moyen commode de lier les faits entre eux et de nous permettre de les grouper sous quelques lois plus générales. Plus tard, quand nous serons plus avancés dans l'étude de l'électricité, nous pourrons étudier en elle-même cette théorie et discuter les objections sérieuses qu'elle présente. Nous verrons que les phénomènes électriques dépendent très-probablement de l'action combinée des particules de la matière et du fluide éthéré qui remplit l'univers, et en nous rapprochant ainsi de la théorie moléculaire de Faraday, nous serons plus près de la vérité qu'avec l'hypothèse des deux fluides impondérables existant par eux-mêmes et d'une manière indépendante des corps [1].

[1] Les principaux travaux faits récemment sur le sujet traité dans ce chapitre, sont :

1° Les mémoires de M. Faraday sur l'induction de l'électricité ordinaire, communiqués à la Société royale de Londres en 1837 et 1838 (*Philosophical transactions of the royal Society of London*, 1838) ;

2° Les mémoires de M. Matteucci sur la polarisation des lames de mica, et sur la propagation de l'électricité dans les corps solides (*Bibliothèque universelle. Archives des sciences physiques*. Genève, 1846, t. II, p. 371. — *Annales de chimie et de physique*. Paris, 1849, t. XXVII, p. 133).

TROISIÈME PARTIE

MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

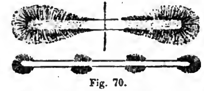
DE L'AIMANT ET DES PHÉNOMÈNES MAGNÉTIQUES.

§ 1. Notions générales sur le magnétisme.

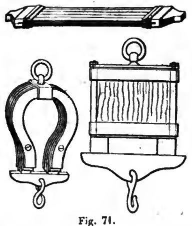
Il existe dans la nature un minerai nommé *pierre d'aimant*, connu de toute antiquité, qui possède la propriété d'attirer en quelques-uns des points de sa surface, qu'on nomme *pôles*, les particules de fer placées près de lui. Ce minerai est un composé de fer et d'oxygène, soit un *deutoxyde de fer*; les anciens le nommaient μαγνης, de la ville de Magnésie en Lydie, où on le trouvait en abondance; de là est venu le nom de magnétisme pour la partie de la physique qui traite des phénomènes dont il est l'origine, et le nom de magnétiques pour désigner ces phénomènes eux-mêmes.

L'une des propriétés les plus remarquables de la pierre d'aimant est celle en vertu de laquelle elle communique la faculté qu'elle possède d'attirer le fer, à une aiguille ou à un barreau d'acier qu'on frotte plusieurs fois de suite, toujours dans le même sens, contre l'un de ses pôles. Cette aiguille ou ce barreau devient ainsi capable d'attirer vers ses extrémités une quantité considérable de limaille ou de morceaux de fer. On dit alors que l'aiguille ou le barreau a été aimanté, et que ses pôles magnétiques sont à ses extrémités. Si le barreau d'acier est d'une longueur de plus de 15 à 20 centimètres, on trouve quelquefois deux ou même quatre autres pôles, outre ceux qui sont aux deux bouts. Ces pôles, qu'on reconnaît à l'accumulation de la limaille de fer qui s'opère autour d'eux, sont toujours en nombre pair et placés deux à deux de chaque côté et à une même

distance du centre; on les nomme pôles secondaires ou points conséquents (fig. 70).


Fig. 70.

Un morceau d'acier aimanté possède aussi, comme la pierre d'aimant, la faculté de communiquer sa vertu magnétique à un autre barreau ou à une aiguille d'acier; il suffit, pour obtenir ce résultat, de frotter dans toute sa longueur, et toujours dans le même sens, contre l'un des pôles de l'aimant, le barreau ou l'aiguille qu'on veut *aimanter*, nom qu'on donne à cette opération. Les aiguilles aimantées peuvent être cylindriques; elles ont cependant le plus souvent la forme d'un prisme ou d'un losange mince et allongé. Quant aux barreaux, ils sont ordinairement prismatiques; ils ont aussi quelquefois la forme d'un fer à cheval, et, pour les renforcer, on en superpose plusieurs les uns sur les autres. Ils sont alors capables d'attirer de grandes masses de fer et de supporter jusqu'à 50 ou 100 livres, sans


Fig. 71.

qu'un poids aussi considérable puisse détacher de leurs pôles le fer qui y est adhérent (fig. 71).

Une autre propriété importante des aimants, c'est l'influence que le globe terrestre exerce sur eux lorsqu'ils sont mobile. En effet, si après avoir aimanté une aiguille d'acier on la suspend par son centre de gravité à un fil, ou qu'au moyen d'une chappe on la mette sur une pointe (fig. 72), on trouve qu'elle prend une direction déterminée vers un point de l'horizon, qui est à peu près celle du sud au nord. Cette direction est tellement constante que, lors même qu'on déplace l'aiguille, elle y revient toujours après un nombre plus ou moins grand d'oscillations, avec une précision parfaite. Il y a plus : c'est toujours la même extrémité de l'aiguille qui est tournée vers le nord et la même qui est tournée vers le sud, en sorte que si l'on tourne l'aiguille de 180°, elle n'est plus en équilibre dans sa nouvelle position, mais elle fait une pirouette et décrit une demi-circonférence d'un côté ou de l'autre pour revenir à sa position primitive. La pointe de l'aiguille qui se dirige vers le nord a été nommée *pôle nord* et celle qui se dirige vers le sud *pôle sud*. Afin de les reconnaître immédiatement, et par conséquent de savoir de quel côté est le nord, on a soin de bleuir légèrement en la chauffant la moitié de l'aiguille qui se dirige du côté du nord, et de laisser sa couleur naturelle à celle qui se porte au sud.

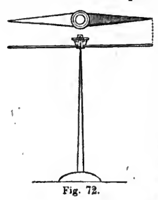


Fig. 72.

La direction de l'aiguille aimantée est constante dans un même lieu, à une époque donnée; mais elle varie d'un lieu à l'autre, et elle change avec les années; elle est même sujette sur un même point du globe à de petites variations périodiques pendant la durée d'un jour, variations qu'on a nommées par cette raison *variations diurnes*.

Nous avons vu que cette direction n'est pas exactement celle du sud au nord; aussi a-t-on nommé *méridien magnétique* le plan qui passe par le centre de la terre et la direction de l'aiguille aimantée dans le lieu qu'on considère, pour le distinguer du *méridien terrestre*, qui est le plan qui passe par ce

même lieu et par l'axe de la terre. L'angle que font ces deux plans, ou, ce qui revient au même, les deux *traces* qu'ils laissent sur la surface de la terre, se nomme la *déclinaison* de l'aiguille aimantée. On la détermine en mesurant l'angle que la direction de l'aiguille aimantée horizontale fait avec la ligne méridienne. La déclinaison est *orientale* ou *occidentale*, suivant que le pôle nord de l'aiguille est à l'est ou à l'ouest de la ligne méridienne. Elle était à Paris de 11° 30′ *à l'est* en 1580, nulle ou de 0° en 1663, de 8° *à l'ouest* en 1700, de 22° en 1785, de 22° 14′ en 1814, et dès lors elle a commencé à diminuer ; elle était en 1849 de 21°.

Elle était à Londres de 11° 15′ *à l'est* en 1576, de 0° de 1657 à 1622, de 2° 6′ *à l'ouest* en 1670, de 24° 2′ 18″ en 1815, époque où elle a atteint son maximum ; elle était en 1849 de 23°. — Elle était à Genève de 19° en 1818, elle était en 1849 de 18°.

Il y a des lieux de la terre où l'aiguille se dirige exactement suivant la ligne méridienne, et pour lesquels par conséquent la déclinaison est nulle. La série de ces lieux ou de ces points *sans déclinaison* ne forme point une courbe régulière ; nous aurons occasion d'y revenir et d'étudier leur distribution.

On nomme *boussole de déclinaison* tout appareil propre à observer et à mesurer la déclinaison, ou réciproquement à déterminer la direction du sud au nord, c'est-à-dire la ligne méridienne, la déclinaison magnétique du lieu étant donnée (fig. 73).

Cet appareil se compose d'une aiguille aimantée délicatement suspendue, soit au moyen d'un fil de soie sans torsion, soit au moyen d'une chappe en agate ou en acier reposant sur un pivot. Un cercle divisé avec soin, sur lequel on lit la division correspondante aux extrémités de l'aiguille, est fixé contre les côtés d'une boîte circulaire en cuivre rouge ou en bois recouverte d'un verre, dans laquelle est placée l'aiguille et la pointe sur laquelle elle repose. L'instrument peut être muni d'une lunette portée sur un axe de rotation parallèle au plan de la division circulaire, et dont le milieu est sur la verticale qui passe par le centre de suspension de l'aiguille. Cet axe porte un niveau à bulle d'air et un quart de cercle vertical di-

visé pour mesurer les angles que décrit la lunette. On peut faire tourner la boîte autour d'un axe vertical par lequel elle est fixée sur son pied, jusqu'à ce que la lunette se trouve placée

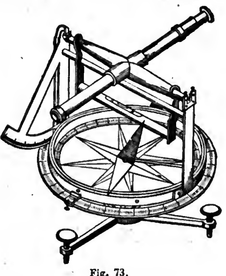


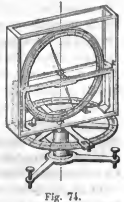
Fig. 73.

dans la direction du méridien. On détermine alors l'angle que fait l'axe de la lunette avec la direction de l'aiguille aimantée, et on a la déclinaison. Ou bien, connaissant cette déclinaison, on fait tourner la boîte jusqu'à ce que l'angle que fait l'axe de la lunette et la direction de l'aiguille lui soit égal, et alors on a la position du méridien. La *boussole marine*, soit *compas de variation*, ne diffère de la boussole ordinaire qu'en ce qu'elle a une double suspension qui lui permet de se maintenir malgré l'agitation de la mer, dans une situation sensiblement horizontale.

Nous avons supposé que l'aiguille aimantée était suspendue par son centre de gravité; mais nous devons ajouter que ce centre de gravité a été déterminé après que l'aiguille a été aimantée. En effet, si on le détermine auparavant, c'est-à-dire si on suspend à un fil de soie sans torsion une aiguille d'acier non aimantée, de manière à ce qu'elle soit parfaitement horizontale, on trouve qu'après avoir été aimantée elle ne garde pas son

horizontalité, quoiqu'elle soit suspendue de la même manière. Elle commence par prendre la direction ordinaire du sud-est au nord-ouest, puis on voit son pôle nord s'incliner comme si la moitié qui est du côté nord était plus pesante que celle qui est du côté sud. On peut s'assurer cependant directement que l'aimantation n'a nullement modifié le poids de l'aiguille ni celui d'aucune de ses parties. L'effet qui se manifeste est le résultat de la même action qui détermine la direction constante de l'aiguille de déclinaison ; on le nomme *l'inclinaison* de l'aiguille ; il se mesure par l'angle que fait avec l'horizon une aiguille qui peut se mouvoir librement autour de son centre de gravité dans le plan du méridien magnétique.

Une boussole d'inclinaison (fig. 74) se compose d'une aiguille traversée à son centre de gravité par un axe cylindrique en acier poli qui repose par ses deux extrémités sur deux couteaux d'agate bien tranchants. Ces deux couteaux sont portés par deux traverses horizontales en métal, parallèles l'une à l'autre, et qui sont les diamètres d'un cercle vertical sur lequel est tracée une division circulaire. On a soin, au moyen d'un artifice très-simple, de placer l'aiguille sur les couteaux de façon que son axe de rotation se trouve exactement passer par le centre du cercle divisé et soit perpendiculaire à son plan. Le plus souvent, au lieu de se servir des couteaux d'agate, on introduit les tourillons d'acier dans des trous cylindriques percés dans les deux traverses horizontales et situés sur la ligne perpendiculaire au plan du cercle et passant par son centre ; mais le frottement, qui est beaucoup plus considérable dans ce mode de suspension que dans l'autre, risque de nuire à la liberté des mouvements de l'aiguille. C'est pourquoi, dans les appareils très-perfectionnés, on emploie de préférence le premier. Ce cercle, soit limbe vertical, repose sur un pied qui est mobile autour d'un axe vertical dont la direction prolongée


Fig. 74.

passe par son centre et par conséquent par l'axe de suspension de l'aiguille. Un cercle azimuthal, soit horizontal, permet de déterminer à chaque instant les angles décrits par le limbe vertical, et par conséquent de placer celui-ci dans tous les azimuths et particulièrement dans la direction du méridien magnétique. L'aiguille aimantée se dirige alors d'elle-même suivant la ligne d'inclinaison. On mesure l'angle au moyen de la division du limbe vertical, qui est munie ordinairement d'une loupe. Il faut faire plusieurs observations et en prendre la moyenne pour parvenir à un résultat exact, parce que la suspension est toujours imparfaite, quelque précaution qu'on prenne, et parce qu'on n'est jamais bien sûr que l'axe de rotation passe exactement par le centre de gravité de l'aiguille. Pour se mettre à l'abri de cette cause d'erreur, on doit faire quatre espèces d'observations et prendre la moyenne des résultats de chacune d'elles. Après les premières observations, on en fait de nouvelles en ayant retourné les faces du barreau sans changer les pôles; puis viennent deux autres séries d'observations pareilles qu'on fait après avoir changé les pôles de l'aiguille en l'aimantant dans le sens contraire, c'est-à-dire en la frottant contre le même pôle d'un aimant dans un sens contraire à celui dans lequel on l'avait primitivement frottée, de façon que l'extrémité qui se dirigeait au sud se trouve dirigée au nord, et celle qui se dirigeait au nord se dirige au sud.

L'inclinaison, qui était à Paris de 75° en 1671, a toujours été en diminuant dès lors; elle était en 1835 de 67° 14′, et, en 1849, de 67°. Elle varie comme la déclinaison, non-seulement avec les époques d'observation, mais encore avec les lieux; à Londres, elle était en 1720 de 70° 27′, en 1833 de 69° 2′, et en 1849 de 68°; à Genève, elle était en 1825 de 65° 48′ 30″, et en 1849 de 64°. Plus on approche du nord, plus elle augmente. Ainsi il existe un lieu à 80° de latitude nord, découvert par le capitaine Parry, où l'inclinaison est de 90°. Par contre, si on s'approche de l'équateur, l'inclinaison diminue; il y a même sur la surface de notre globe une série de points où elle est absolument nulle, et qui forment autour de la terre une courbe qu'on appelle l'*équateur magnétique*. Cette courbe est assez ré-

gulière dans une partie de son cours, et elle peut être regardée comme un grand cercle incliné de 12 à 13° à celui de l'équateur terrestre. Au delà de l'équateur l'inclinaison recommence et augmente à mesure qu'on s'approche du pôle austral ; mais c'est alors le pôle sud, et non le pôle nord de l'aiguille qui s'incline au-dessous de l'horizon.

Lorsqu'on ne connaît pas la déclinaison et qu'on a à faire une observation d'inclinaison, on peut sans boussole de déclinaison déterminer facilement le plan du méridien magnétique en cherchant le plan dans lequel l'aiguille d'inclinaison se tient parfaitement verticale; ce plan est perpendiculaire à celui du méridien. Lors donc qu'on a déterminé le premier on connaît le second, et on y place l'aiguille en faisant décrire au cercle vertical un angle de 90° sur le cercle azimuthal. Cette liaison, si simple entre les deux plans, provient de ce que l'aiguille aimantée se plaçant naturellement, lorsqu'elle est libre, dans le plan du méridien magnétique et n'étant point sollicitée à en sortir, elle doit évidemment, pour obéir à cette loi, prendre la position verticale quand le plan où elle est obligée de se mouvoir est perpendiculaire à celui du méridien magnétique, car de cette manière elle se trouve être à la fois dans les deux plans.

La force qui détermine la direction de l'aiguille aimantée n'est, en effet, ni attractive ni répulsive; mais seulement une force directrice incapable d'imprimer aux aimants un mouvement quelconque de translation. C'est ce qu'on peut prouver par différentes expériences; ainsi une aiguille aimantée flottante sur l'eau au moyen d'un morceau de liége auquel on l'a fixée n'éprouve aucun glissement; elle prend simplement la direction du méridien magnétique comme les aiguilles, qui, reposant sur un pivot, sont retenues à leur centre. Une aiguille aimantée fixée en travers et à l'extrémité d'une planchette horizontale, avec un contrepoids à l'extrémité opposée pour maintenir l'équilibre (fig. 75), se dirige encore exactement dans le plan du méridien magnétique quand on suspend la planchette par son centre de gravité à un fil de soie sans torsion, quoique ce centre ne soit point celui de l'aiguille. Enfin, si on leste une

aiguille aimantée par un morceau de platine de manière à la faire tenir en équilibre dans l'intérieur d'une masse de mercure, et à la soustraire ainsi à l'action de la pesanteur, on la voit se placer dans le méridien magnétique et y prendre une direction inclinée vers le nord, parfaitement semblable à la direction de l'aiguille d'inclinaison. Cette direction est donc celle qui résulte naturellement, et abstraction faite de tout mode de suspension, de l'action qu'exercent sur l'aiguille aimantée les forces ou la force qu'on nomme *magnétisme terrestre.*

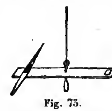


Fig. 75.

On n'est pas arrivé de prime-abord à reconnaître que c'est de la terre qu'émane la force qui imprime à l'aiguille aimantée la direction que nous venons de déterminer. Les uns avaient placé le siége de cette force dans une petite étoile qui forme la queue de la grande Ourse, les autres la plaçaient au delà encore. Gilbert, le premier, à la fin du seizième siècle, montra, dans un ouvrage très-remarquable, intitulé *Physiologie de l'aimant*[1], qu'il fallait la chercher dans le globe terrestre, résultat qui découlait évidemment des observations faites en divers lieux de la surface de la terre. Nous verrons plus tard, en effet, qu'au moyen de ces observations nombreuses et variées, il devient facile de déterminer les directions des forces qui sollicitent l'aiguille, et que ces directions sont telles, que c'est évidemment de la terre qu'émanent ces forces elles-mêmes. On s'est même assuré que l'intensité du magnétisme terrestre varie, comme la déclinaison et l'inclinaison, avec le temps et avec les lieux et qu'elle augmente de l'équateur aux pôles. Quant à la nature des forces magnétiques émanées de la terre, les conjectures qu'on a formées à cet égard sont liées aux propriétés des aimants; nous aurons soin de les indiquer en étudiant ces propriétés; mais nous ne pourrons en examiner la valeur que dans le chapitre de la cinquième partie où nous nous occuperons des sources naturelle de l'électricité et du magnétisme terrestre.

[1] *Physiologia nova, de magnete magneticisque corporibus. Londres,* 1600.

La découverte de la boussole est beaucoup moins ancienne que celle de l'aimant. Il paraît que le premier navigateur européen qui s'en est servi est Vasco de Gama, dans sa première expédition dans l'Inde. Cependant il est fait expressément mention dans un dictionnaire chinois terminé dans l'an 121 de l'ère chrétienne, et dans un autre dictionnaire complété sous le règne de Kang-hi, du fait que, sous la dynastie de Tsin (419 ans avant J.-C.), les vaisseaux se dirigeaient vers le sud au moyen de l'aimant. La découverte de la déclinaison paraît remonter jusqu'à Christophe Colomb; le premier il aperçut en 1492, lorsqu'il parcourait l'Océan pour aller découvrir le nouveau monde, que l'aiguille ne se tournait pas directement au nord dans tous les lieux de la terre, comme on l'avait cru jusqu'alors. Quant au changement de déclinaison dans le même lieu, il fut découvert en 1622 par Gunter, professeur au collége de Gresham; l'inclinaison fut découverte en 1576, par Normann.

Jusqu'ici nous n'avons considéré une aiguille ou un barreau aimanté qu'isolé; nous lui avons reconnu la propriété d'attirer le fer à ses pôles, celle d'être dirigé lorsqu'il est mobile par l'action de la terre, celle enfin de communiquer la vertu qu'il possède à d'autres barreaux ou aiguilles d'acier. Mais les aimants possèdent d'autres propriétés, qui se manifestent en particulier quand on les approche les uns des autres, telles, par exemple, qu'une attraction et une répulsion mutuelles. Si on approche du pôle nord d'une aiguille aimantée librement suspendue le pôle nord d'une autre aiguille ou d'un barreau qu'on tient à la main, on voit aussitôt une répulsion très-prononcée s'établir entre les deux pôles; il en est de même si on présente les deux pôles sud l'un à l'autre; ces répulsions ont lieu à distance et sont très-énergiques. Mais si au pôle nord de l'aiguille mobile on présente le pôle sud de la fixe, ou à son pôle sud le pôle nord de l'autre, ce n'est plus une répulsion, mais une forte attraction qui a lieu; le pôle de l'aiguille mobile se précipite sur le pôle de la fixe, et il se manifeste une adhérence entre eux qui dure tant qu'on ne parvient pas, par un effort énergique, à les détacher l'un de l'autre; ce qui établit

entre ces attractions et les attractions électriques, qui cessent à l'instant même du contact, une différence bien caractéristique. La répulsion des deux pôles du même nom, de la même aiguille sur les deux pôles du même nom d'une autre aiguille, se manifeste d'une manière très-sensible, quand on approche parallèlement l'une de l'autre deux aiguilles mobiles qui ont leur direction du sud au nord.

Les attractions et les répulsions magnétiques ne sont nullement influencées par le milieu interposé entre les deux aimants, ou entre l'aimant et le corps magnétique, lorsqu'il s'agit de la simple attraction exercée par un corps aimanté sur un corps qui ne l'est pas. Ces actions ont lieu avec la même force que le milieu interposé, soit l'air, le vide ou une substance quelconque. Il faut seulement que le milieu ne soit pas lui-même magnétique. Ainsi une plaque de bois, de verre, d'un métal non magnétique, une feuille de papier ou de carton, une couche d'un liquide ou d'un gaz quelconque, l'interposition d'une flamme, ne modifient en rien ce genre d'action; la distance seule exerce sur son intensité une influence que nous ne tarderons pas à apprécier.

Les expériences que nous venons de rapporter, jointes aux observations relatives à la direction de l'aiguille aimantée par l'influence du globe terrestre, établissent le fait important que, lors même qu'ils attirent également le fer, les deux pôles situés aux extrémités opposées d'un barreau aimanté présentent des différences essentielles dans leurs propriétés, et une espèce d'antagonisme analogue à celui qui existe entre les deux électricités. Ainsi, lorsqu'on aimante un morceau d'acier ou de fer en le frottant toujours dans le même sens, le long de l'un des pôles d'un aimant, le pôle qu'acquiert l'extrémité de la barre d'acier qui est la dernière en contact avec l'aimant dépend de celui des deux pôles de cet aimant contre lequel le frottement a lieu, et est toujours d'un nom contraire au sien. Si c'est le pôle nord qui sert à l'aimantation, l'acier prend un pôle sud à celle de ses extrémités qui reste la dernière en contact avec ce pôle nord, et par conséquent acquiert un pôle nord à l'autre de ses extrémités.

L'acier n'est pas le seul corps qui soit susceptible d'être aimanté; le fer lui-même, le cobalt et le nickel possèdent la même propriété. Non-seulement ces corps attirent une aiguille aimantée lorsqu'on les présente à l'un de ses pôles ou sont attirés par elle, mais ils peuvent être aimantés, et par conséquent acquérir toutes les propriétés que possède un aimant, celle d'avoir deux pôles, d'être influencés par le magnétisme terrestre, etc. Toutefois, il existe des différences, sous ce rapport, entre ces divers métaux. Ainsi le fer, quand il est bien doux, c'est-à-dire bien recuit et dépouillé, autant que possible, de charbon, n'acquiert qu'un magnétisme passager. Si l'on touche l'extrémité d'un cylindre ou d'un fil de fer doux avec le pôle d'un aimant, on voit aussitôt l'autre extrémité de ce cylindre attirer la limaille de fer et agir sur une aiguille aimantée; en un mot, on y découvre l'existence d'un pôle magnétique de même nom que celui de l'aimant avec lequel le cylindre est en contact par son autre extrémité. Mais aussitôt que le contact cesse, la limaille de fer tombe et le pôle disparaît; en un mot, le fer doux perd toutes ses propriétés magnétiques, ou si du moins il les conserve quelques instants, elles sont singulièrement affaiblies. Ainsi le fer doux peut donc instantanément acquérir le magnétisme, mais il le perd aussi immédiatement après qu'a cessé la cause qui l'a produit. Remarquons toutefois que, pendant qu'il est sous l'influence de l'aimant, le fer doux acquiert un magnétisme plus fort qu'un morceau d'acier semblable aimanté par la même puissance. Une aiguille d'acier ne prend pas si facilement le magnétisme; un simple contact avec le pôle d'un aimant ne suffit pas, ordinairement, pour l'aimanter; il faut ensuite la frotter le long de ce pôle plus ou moins longtemps, toujours dans le même sens; mais elle conserve indéfiniment le magnétisme qu'elle a acquis. La trempe augmente dans l'acier cette double propriété, qui établit sous ce rapport une différence si marquée entre lui et le fer doux. Le nickel et le cobalt se rapprochent plus à cet égard de l'acier que du fer, quoiqu'ils ne puissent acquérir une vertu magnétique aussi considérable que celle que prend l'acier trempé.

L'aimantation peut avoir lieu à distance comme au contact;

il suffit, par exemple, pour qu'un cylindre de fer doux devienne magnétique, d'en approcher, sans que le contact soit nécessaire, le pôle d'un aimant. On peut mettre en évidence d'une manière très-simple cette action, en suspendant deux bouts de fil de fer à deux fils de soie, comme les deux balles de sureau d'un électroscope; on en approche le pôle d'un barreau aimanté, et aussitôt on les voit s'écarter l'un de l'autre, par l'effet répulsif qu'exercent les pôles de même nom qu'ils acquièrent à leurs extrémités inférieures et supérieures. Mais aussitôt qu'on éloigne l'aimant, les deux bouts de fil de fer se rapprochent en reprenant leur position verticale, preuve que leur aimantation a cessé. Le nickel et le cobalt présentent le même phénomène, mais il est d'autant moins prononcé que le corps magnétique a moins de facilité à être promptement aimanté.

L'attraction qu'exercent les aimants sur la limaille de fer, et en général sur les corps magnétiques ou aimantés, tient à ce que les aimantant par leur influence à distance, ils déterminent dans la partie du corps la plus rapprochée d'eux un pôle contraire à celui qui agit; et c'est entre ces deux pôles opposés que l'attraction se manifeste, comme si les deux corps étaient aimantés. Il est cependant toujours facile de distinguer une substance aimantée d'un corps simplement susceptible de l'être, et appelé, par cette raison, magnétique. Il suffit pour cela de présenter tous les points d'une substance au même pôle d'une aiguille aimantée; si l'action est partout attractive, le corps n'est que magnétique, mais si elle est attractive en quelques points et répulsive en d'autres, c'est un signe que le corps a deux pôles contraires, et que par conséquent il est aimanté. Il ne faut pas que l'aiguille qui sert à cette épreuve soit trop fortement aimantée, car elle risquerait, si la substance soumise à l'expérience n'avait qu'un faible magnétisme, de ne point indiquer de différence entre ses pôles, en agissant sur elle comme sur du fer doux et en l'attirant également dans tous ses points.

Le globe terrestre peut, comme un aimant, exercer à distance son pouvoir magnétisant. Si l'on tient verticalement, ou encore mieux, dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, une barre de fer doux d'un mètre de longueur, on trouve qu'elle acquiert

deux pôles : un pôle nord à son extrémité inférieure, et un pôle sud à son extrémité supérieure. L'existence de ces deux pôles se manifeste par l'action attractive et répulsive qu'exercent les deux extrémités de la barre sur le même pôle d'une aiguille aimantée, délicatement suspendue, qu'on en approche. Le globe terrestre agit donc comme agirait un gros aimant dont l'axe, passant par le centre de la terre, serait situé dans le méridien magnétique, et qui aurait au nord un pôle contraire à celui de l'aiguille qui est dirigé au nord, et au sud un autre pôle contraire également à celui de l'aiguille qui est dirigé au sud. Cette hypothèse sur la cause du magnétisme terrestre expliquerait également la direction de l'aiguille aimantée, qui serait la conséquence des attractions exercées par les pôles magnétiques du globe sur les pôles contraires de l'aiguille aimantée. Il suffirait donc pour connaître la position du pôle magnétique de la terre, situé au nord, de déterminer avec soin la direction de l'aiguille d'inclinaison dans quelques lieux différents, et l'intersection de ces lignes serait le point où se trouverait le pôle cherché. Il faudrait en faire autant de l'autre côté de l'équateur magnétique, pour déterminer la position du pôle magnétique terrestre situé au sud. Mais il se trouve que les directions prolongées de l'aiguille d'inclinaison, soit dans l'hémisphère boréal, soit dans l'hémisphère austral, ne se coupent pas toutes exactement au même point; ce qui semblerait prouver qu'il n'y a pas dans chaque hémisphère un seul pôle ou un seul centre d'action magnétique. Nous reviendrons en détail sur ce sujet intéressant de physique terrestre, quand nous traiterons des observations nombreuses qu'on a réunies sur les divers phénomènes du magnétisme terrestre, et des hypothèses qu'on a faites sur son origine et sa nature.

Il n'est pas inutile de mentionner ici une dénomination encore usitée dans les ouvrages français, et qui doit son origine à la théorie de l'aimant terrestre. Partant de l'hypothèse que la terre possède deux pôles magnétiques, et du principe établi par l'expérience que ce sont les pôles de nom contraire qui s'attirent, on avait appelé pôle *austral* celui de l'aiguille aimantée qui se dirige au nord, parce que, disait-on, il est attiré par le pôle magnétique de la terre, situé au nord, et qui est naturellement

le pôle boréal ; on avait appelé, par la même raison, pôle *boréal* de l'aiguille celui qui se dirige au sud, parce que, disait-on, il est attiré par le pôle austral du globe. Quant à nous, préférant une dénomination fondée sur un fait à celle qui s'appuie sur une théorie plus ou moins contestable, nous continuerons à appeler pôle *nord* de l'aiguille celui qui se dirige au nord, et pôle *sud* celui qui se dirige au sud.[1]

L'aimantation que produit le magnétisme terrestre est facilitée par toutes les actions, soit mécaniques, soit chimiques, qui dérangent les molécules du fer de leur position naturelle d'équilibre. Ainsi, la percussion, la torsion, toute espèce de vibration imprimée à une barre de fer, déterminent chez elle la présence des deux pôles magnétiques; la simple oxydation à l'air produit le même effet. Pour s'assurer que cette aimantation est bien due à l'influence du magnétisme terrestre, et non à ces actions elles-mêmes, il suffit d'examiner la position des pôles dans les barres soumises à l'expérience, et on trouve que cette position est toujours celle qui résulterait de l'action immédiate du globe; ainsi, c'est toujours le pôle nord qui se trouve à celle des extrémités de la barre qui est inclinée au-dessous de l'horizon ou à celle qui est tournée du côté du nord, si la barre est horizontale. On peut même, si la barre est d'un fer bien doux, changer immédiatement ses pôles en la retournant brusquement, de façon que l'extrémité qui était dirigée au nord le soit au sud, et que celle qui était dirigée au sud le soit au nord. Il y a plus : il est facile de constater que, quelle que soit l'action qui sollicite le corps, le magnétisme qu'il acquiert est d'autant plus intense que sa position le rapproche davantage de la direction de l'aiguille aimantée, et qu'il devient tout à fait nul si la barre est placée dans une position parfaitement perpendiculaire à cette direction. On a ainsi la preuve évidente que l'effet ne provient pas d'une manière immédiate de l'action à laquelle la barre est soumise, mais uniquement du magnétisme terrestre dont l'influence est favorisée par cette action.

C'est encore à l'influence de ce magnétisme qu'on doit attribuer l'aimantation que possèdent tous les corps magnétiques laissés plus ou moins longtemps à la même place; ainsi les tiges des pa-

ratonnerres, les pointes des clochers[1], les barreaux ou autres objets de fer placés dans les constructions, offrent toujours des traces de magnétisme; il en est de même des outils en fer ou en acier, tels que ceux d'un serrurier, ou tels que les poinçons ou instruments tranchants qui sont sujets à éprouver, par l'usage auquel on les emploie, des mouvements vibratoires. On peut même, par l'aimantation opérée au moyen du globe terrestre, se procurer de forts aimants en prenant un certain nombre de fils de fer, de 30 à 40 centimètres de longueur, et en les tordant fortement pendant qu'on les tient dans une position verticale, ou encore mieux dans la direction de l'aiguille d'inclinaison. Cette opération, qui les rend plus roides, facilite en même temps le développement chez eux d'un fort magnétisme; et une fois qu'ils ont été aimantés, on les réunit pour en former un faisceau, en ayant soin que leurs pôles semblables soient tous à la même extrémité du faisceau.

L'action aimantante que le magnétisme terrestre exerce sur le fer peut déterminer sur les aiguilles de boussole des déviations fâcheuses, quand elles sont placées sur des vaisseaux en marche. En effet, ces bâtiments, qui renferment dans leur construction une quantité toujours considérable de barres, de lames et de tiges de fer, se trouvent, par le fait, contenir des aimants dont les pôles doivent changer avec la position du vaisseau, par rapport au méridien magnétique. Il en résulte sur l'aiguille une action variable, dont l'effet est impossible à déterminer d'avance, tandis que si le bâtiment restait toujours à la même place, il serait facile d'apprécier l'influence de cette cause de déviation et d'en tenir compte. Aussi les navigateurs sont-ils exposés à faire de grandes erreurs, qui peuvent avoir les plus graves conséquences. Supposons, par exemple, que l'axe du vaisseau, c'est-à-dire la ligne qui va de sa poupe à sa proue, fût d'abord perpendiculaire au plan du méridien magnétique et dirigé à l'ouest; que, dans cette position, la déviation de l'aiguille fût

[1] Il est probable que quand il s'agit des pointes en fer élevées, telles en particulier que celles des paratonnerres, l'électricité atmosphérique, et plus particulièrement celle de la foudre, contribue pour sa part à leur aimantation, autant et plus que le magnétisme terrestre.

de 20° à l'ouest de la direction qu'elle devrait avoir; un changement dans la marche du bâtiment fait que l'axe vient à tourner de 180°, c'est-à-dire de l'ouest à l'est; par l'effet de ce changement de direction, la déviation a également passé de l'ouest à l'est, et est par conséquent de 20° à l'est. Il est évident que l'observateur qui ne connaîtrait pas l'action du fer contenu dans le vaisseau auquel sont dues ces deux déviations de 20°, d'abord à l'ouest, ensuite à l'est, croirait que l'aiguille est demeurée parallèle à elle-même, et devrait juger que la rotation du vaisseau n'a été que de 180° — 2 fois 20° ou 180° — 40°, c'est-à-dire de 140°, tandis qu'elle a été réellement de 180°. Il se tromperait donc de 40° sur la seconde direction du navire, en supposant qu'il eût déterminé avec soin la première direction par les procédés ordinaires.

M. Barlow a proposé divers moyens d'éviter les erreurs dangereuses pour la navigation que nous venons de signaler. L'un de ces moyens consiste à placer dans le voisinage de la boussole une plaque de fer doux qui s'aimante comme les autres masses de fer du vaisseau, par l'influence du globe. Cette plaque est placée dans le voisinage de la boussole, de façon que son action sur l'aiguille soit équivalente à l'action totale de tout le fer distribué dans le vaisseau. Il en résulte que dès qu'on enlève la plaque, on réduit à la moitié la déviation totale, et l'autre moitié qui alors est connue est par conséquent le montant de la déviation due au fer du vaisseau. On détermine préalablement par des tâtonnements la position qu'on doit donner à la plaque, pour rendre son action équivalente à celle de tout le fer du vaisseau.

Un autre moyen a été employé également par M. Barlow: des expériences nombreuses faites en plaçant le vaisseau dans toutes les positions azimutales, et en comparant au moyen de deux lunettes la direction de sa boussole dans chaque position avec celle d'une aiguille aimantée restée sur le rivage, permettent ainsi de déterminer empiriquement la correction qu'il faut faire à la déviation observée, pour avoir la véritable déclinaison magnétique du lieu où se fait l'observation. Mais ce procédé exige, comme le précédent, une série d'opérations distinctes pour

chaque vaisseau en particulier, celles faites pour l'un ne pouvant servir pour un autre; elle n'est pas non plus sans quelques difficultés dans la pratique.

M. Poisson, pénétré de l'importance pour la navigation de la question que nous venons de traiter, et convaincu qu'elle n'était qu'imparfaitement résolue par les moyens empiriques que nous avons indiqués, a essayé de la soumettre à l'analyse, et de parvenir ainsi à une formule générale de correction. Il s'est proposé de déterminer directement l'inclinaison et la déclinaison vraies en un lieu quelconque du globe, d'après les observations de la boussole faites à bord d'un vaisseau et sous l'influence du fer qu'il contient. Ce fer étant aimanté par la force magnétique de la terre, il est évident que son action sur l'aiguille sera proportionnelle à cette force. De plus, les composantes de cette action, relatives à trois axes rectangulaires qui passent constamment par les mêmes points du navire, ont pour expression des fonctions linéaires par rapport aux composantes de l'action du globe suivant ces mêmes axes. La force magnétique du globe est alors commune à tous les termes de l'équation d'équilibre de la boussole, et en disparaît conséquemment. La formule renferme différents termes qu'il faut déterminer, et en particulier les quantités dépendantes de la totalité et de la distribution du fer que le vaisseau renferme. Mais par différentes considérations tenant à la distribution, en général symétrique, des masses de fer dans les vaisseaux, et à leur position, qui est pour la plus grande partie inférieure au plan horizontal mené par le point de suspension de la boussole, M. Poisson arrive à simplifier le problème. Les deux inconnues à déterminer sont l'inclinaison et la déclinaison vraies, et pour cette détermination il suffit de deux données de l'observation; celles qu'exige la formule simplifiée de M. Poisson sont les angles de la section principale ou de l'axe du vaisseau avec la direction apparente de la boussole, avant et après qu'on a fait tourner cette section ou cet axe d'un angle connu. D'autres formules permettent même d'éviter cette manœuvre, et de se contenter d'observer les directions de la boussole avant et après l'addition d'une masse de fer qu'on place toujours de la même

manière, et de façon à être assez rapprochée de la boussole pour en changer la direction.

Parmi les actions qui facilitent l'aimantation pour le magnétisme terrestre, l'une des plus efficaces consiste à chauffer jusqu'au rouge le corps magnétique et à le laisser refroidir sous l'influence de ce magnétisme. Le refroidissement qui suit une élévation de température bien moindre est même suffisant. MM. Moser et Riess ont constaté que c'est à ce genre d'effet qu'il faut rapporter les phénomènes d'aimantation qu'on avait cru être produits par les rayons de lumière, et notamment par les rayons violets. Ils ont constaté que ces effets n'ayant plus lieu quand les aiguilles qui les éprouvaient étaient dans une position perpendiculaire au méridien magnétique, ils ne peuvent être attribués qu'au magnétisme terrestre, dont l'action est facilitée par l'élévation de température que déterminent les rayons solaires, ou plutôt par le refroidissement qui la suit. La chaleur, en effet, loin d'augmenter diminue au contraire notablement l'intensité de la vertu magnétique. Un barreau d'acier aimanté porté au rouge blanc perd totalement son magnétisme; s'il redevient magnétique en se refroidissant, c'est à l'action de la terre qu'il le doit. Un barreau de fer doux n'est plus même magnétique, c'est-à-dire n'est plus attiré par l'aimant, quand il est chauffé simplement jusqu'au rouge. Le nickel cesse d'être magnétique à la température de l'huile bouillante. Quant au cobalt, sa force magnétique ne semble pas diminuer graduellement, comme cela a lieu pour les autres substances, à mesure que sa température augmente; mais elle cesse tout d'un coup à une température extrêmement élevée, et puis elle reparaît tout aussi rapidement quand on fait descendre le métal de ces hautes températures.

L'influence remarquable qu'exerce sur le magnétisme l'élévation de la température avait fait croire à quelques physiciens que la propriété que possèdent certains corps d'être magnétiques, tenait à la petite distance qui existe chez eux entre les atomes dont ils sont formés.

En effet, le fer, le cobalt et le nickel sont parmi les corps ceux qui, sous le même volume, renferment le plus grand nombre

d'atomes et par conséquent ceux dont les atomes sont les plus rapprochés. Chauffer ces corps, c'est éloigner leurs particules les unes des autres; or puisque cette augmentation de distance leur fait perdre, lorsqu'elle est poussée à un certain point, leurs propriétés magnétiques, il en résulte que les substances chez lesquelles les atomes sont naturellement plus éloignés ne peuvent pas posséder ces propriétés. Que faire donc pour la leur procurer? Rapprocher leurs particules, et pour cela refroidir ces corps. Guidé par cette idée ingénieuse, Faraday avait exposé à une température excessivement basse la plupart des métaux et plusieurs de leurs composés, ainsi que du charbon, et quoiqu'il eût agi sur eux avec un très-fort aimant, il n'avait pu y découvrir aucune trace de magnétisme; il avait eu soin de prendre tous ces corps à un état de grande pureté et dépouillés de toute trace de fer. Au moyen d'un mélange d'éther et d'acide carbonique placé dans le vide, il avait réussi à abaisser leur température jusqu'à 105° centig. au-dessous de 0°. Le manganèse lui-même n'a présenté aucune trace de magnétisme. M. Faraday a montré que c'est à la présence de quelques particules de fer, dont il est difficile de le dépouiller, que ce métal avait dû jusqu'alors d'être rangé par erreur parmi ceux qui sont magnétiques. Ainsi le fer, le nickel, le cobalt et l'acier sembleraient être les seuls corps de la nature qui soient magnétiques, c'est-à-dire qui présentent les propriétés magnétiques telles que nous venons de les étudier et de les définir. Cependant nous verrons, dans le dernier chapitre de cette troisième partie, que Faraday est parvenu par un autre moyen à découvrir dans tous les corps également des propriétés magnétiques évidentes, mais variables dans la forme sous laquelle elles se manifestent avec la nature de ces corps eux-mêmes.

§ 2. Moyens de mesurer les forces magnétiques.

Après avoir étudié d'une manière générale les phénomènes magnétiques, nous devons maintenant chercher à découvrir les lois qui les régissent; mais pour pouvoir nous livrer à ce genre de recherches, il nous faut auparavant étudier les moyens

de mesurer avec exactitude les forces auxquelles les actions magnétiques sont dues.

Deux méthodes nous sont offertes ici, comme dans la mesure des forces électriques. La première méthode repose sur l'emploi de la balance de torsion, dans laquelle on remplace par une aiguille aimantée la tige de verre qui porte le petit corps électrique et qui est fixée à l'extrémité inférieure du fil de torsion. Il faut seulement avoir soin que cette aiguille soit assez longue sans être trop pesante. Coulomb faisait usage d'une aiguille d'acier cylindrique de 4 millimètres de diamètre et de 65 centimètres de longueur; il s'assurait préalablement, avant d'en faire usage, qu'elle n'avait point de pôles intermédiaires, et que, par conséquent, elle ne possédait que deux pôles placés chacun à une de ses extrémités. La seconde méthode est celle des oscillations; elle consiste à faire osciller une aiguille aimantée, et à déduire l'intensité de l'action à laquelle on la soumet de la comparaison entre le nombre d'oscillations que l'aiguille exécute sous l'influence de cette action et le nombre qu'elle en fait quand elle y est soustraite.

Dans l'une et l'autre méthode, il y a un élément dont il faut tenir compte, et qui n'existait pas dans la mesure des forces électriques : c'est la force directrice de la terre. Ainsi, tandis que, lorsqu'il s'agit de l'électricité, la torsion du fil influe seule sur la résistance que le corps électrisé mobile oppose à l'action d'un autre corps électrisé, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit d'une aiguille aimantée; car alors la force avec laquelle cette aiguille tend à obéir à l'action directrice de la terre s'ajoute à la torsion pour combattre l'action d'une force extérieure attractive ou répulsive. Ainsi encore, tandis que les oscillations du corps électrisé se font comme s'il n'était pas électrisé, quand il n'y a point d'autres corps en présence, celles d'une aiguille d'acier sont toutes différentes, selon que cette aiguille est aimantée ou qu'elle ne l'est pas, parce que dans le premier cas les oscillations sont influencées par le magnétisme terrestre, et que dans le second cas cette influence n'existe pas. Voyons comment, dans chacune des deux méthodes, on peut apprécier cette influence.

Pour l'évaluer quand on fait usage de la balance de torsion, il faut commencer par suspendre une aiguille non aimantée au fil de la balance, puis tourner la pièce qui porte ce fil jusqu'à ce que le 0° de torsion se trouve dans le plan du méridien magnétique; on aimante ensuite l'aiguille qu'on avait suspendue au fil, et on la replace exactement de la même manière. Il en résulte que, lorsque, obéissant à l'action directrice de la terre, l'aiguille aimantée se place dans le méridien magnétique, la torsion du fil de la balance se trouve nulle. On tord le fil en tournant la pièce supérieure, soit dans un sens, soit dans l'autre, de manière à porter le pôle nord de l'aiguille à l'ouest ou à l'est : le résultat est le même dans les deux cas. On s'assure que, tant que l'angle de déviation qu'on fait décrire à l'aiguille ne dépasse pas 20°, il est proportionnel à l'angle de torsion; c'est-à-dire qu'on s'assure que, après avoir tordu le fil d'un certain angle, de 35° par exemple, pour faire dévier l'aiguille de 1° à l'est ou à l'ouest, il faut le tordre d'un angle double, c'est-à-dire de 70°, pour opérer une déviation de 2° dans le même sens, d'un angle triple, c'est-à-dire de 105° pour une déviation de 3°, et ainsi de suite. La force directrice de la terre, qui tend à ramener l'aiguille aimantée dans le méridien magnétique, est donc représentée dans chaque cas par les angles de torsion, qui la maintiennent à des distances angulaires plus ou moins grandes de ce méridien; et comme les angles de torsion sont proportionnels à ces distances angulaires, la force elle-même leur est proportionnelle. Ce n'est pas rigoureusement aux angles, mais bien aux sinus des angles de déviation, que l'angle de torsion, et par conséquent la force directrice, est proportionnelle, ainsi que le prouvent, et l'observation faite avec des déviations plus considérables, et un simple calcul basé sur la considération des forces qui sollicitent l'aiguille. Mais ce même calcul montre, ainsi que l'expérience, que lorsque l'angle ne dépasse pas 20°, on peut, sans erreur sensible, le prendre pour son sinus.

Il ne reste plus maintenant, quand on veut mesurer les forces magnétiques avec la balance de torsion, qu'à déterminer pour l'aiguille aimantée qu'on suspend au fil, et qu'on nomme aiguille

d'épreuve, l'angle de torsion nécessaire pour la faire dévier d'un degré de sa position naturelle. Cet angle doit varier avec le fil de torsion qu'on emploie, l'aiguille qu'on y suspend, et l'intensité du magnétisme terrestre au lieu où l'on opère. Coulomb avait trouvé que cet angle était à Paris, avec sa balance et pour l'aiguille dont il se servait, de 35°. Quand donc une force quelconque éloigne l'aiguille du 0° de torsion et du méridien magnétique avec lequel on a fait coïncider ce 0°, comme nous l'avons dit, il y a deux forces qui tendent à l'y ramener et dont la somme est égale, lorsque l'équilibre est établi, à celle qui tend à l'en éloigner; ces deux forces sont, l'une la torsion représentée par l'angle de torsion, l'autre la force directrice de la terre. Mais pour ajouter celle-ci à l'autre, il faut l'évaluer en torsion; or cela est facile, une fois qu'on sait que chaque degré de déviation correspond à 35° de torsion. Ainsi la force qui maintiendra l'aiguille à 10° de distance du 0° sera d'abord la torsion de 10°, plus 10 fois 35°, soit en tout une force équivalente à 360° de torsion.

Pour apprécier l'influence de la force directrice dans la seconde méthode, il faut se servir de la formule du pendule; l'aiguille aimantée oscille en effet comme un pendule, seulement la pesanteur est remplacée ici par l'action également attractive qu'exerce sur l'un des pôles de l'aiguille le magnétisme terrestre. Il en résulte que l'intensité de la force est en raison du carré du nombre des oscillations qui ont lieu dans le même temps. Cette conséquence suppose que les oscillations sont exécutées par une aiguille d'inclinaison placée dans la direction de la force qui la sollicite, c'est-à-dire dans le méridien magnétique et oscillant dans ce plan, exactement comme le pendule est placé dans la direction de la force de la pesanteur et oscille dans un plan vertical. Toutefois on démontre que la même formule ou loi peut s'appliquer, sans erreur sensible, au cas où l'aiguille est une aiguille de déclinaison oscillant dans un plan horizontal. Il faut donc commencer, quand on veut se servir de la méthode des oscillations, par déterminer avec soin pour l'aiguille dont on fait usage, et qui est toujours l'aiguille d'épreuve, le nombre des oscillations qu'elle fait dans un temps donné, en

prenant la précaution d'éloigner d'elle tout corps aimanté ou susceptible de l'être, tel que du fer, afin qu'elle ne soit sollicitée par aucune autre force que par celle du magnétisme terrestre. Il est aussi entendu que les expériences, pour être comparables, doivent être faites non-seulement avec la même aiguille aimantée, mais dans le même lieu, afin que l'intensité du magnétisme terrestre soit constante [1].

§ 3. Loi des attractions et des répulsions magnétiques.

Nous commencerons par appliquer les méthodes que nous venons d'exposer à la détermination de la loi que suivent, avec la distance, les attractions et les répulsions magnétiques.

Coulomb, pour appliquer la première méthode, celle qui repose sur l'emploi de la balance de torsion, avait suspendu au fil de torsion la même longue aiguille d'acier pour laquelle la force directrice du globe terrestre était représentée par 35° de torsion pour 1° de déviation du méridien magnétique. Une seconde aiguille aimantée, semblable à la première, fut placée verticalement dans le méridien magnétique, de façon à agir par son pôle nord sur le pôle nord de l'aiguille d'épreuve. La disposition de l'aiguille était telle que les deux points agissant immédiatement l'un sur l'autre, ou qui auraient été le lieu d'entrecroisement des deux aiguilles si elles avaient été en contact, étaient à 2,5 centimètres des extrémités de chacun. Ces points étaient ceux du maximum des forces répulsives. L'aiguille mobile fut chassée immédiatement à une distance de 24° du méridien magnétique; ce qui donnait, pour faire équilibre à la force répulsive à cette distance de 24°, une force de torsion de 24°, plus la force directrice de la terre équivalente à 24° × 35° de torsion, en tout 864°. On rapprocha l'aiguille mobile en tournant la pièce supérieure, et on trouva que, pour la ramener à une distance de 17°, il avait fallu faire décrire à la pièce trois circonférences ou tordre le fil de 1080° par en haut. La force totale était donc composée : 1° des 17° de torsion dont l'aiguille

[1] Voir, pour les développements mathématiques relatifs aux deux méthodes, la note finale C.

était distante du 0° de torsion, son point de départ; 2° des 1080° de torsion nécessaire pour la maintenir à la distance de 17°; 3° des 17° × 35°, soit 595° de torsion qui représentaient l'effet de la force directrice de la terre. Cela fait en tout 1692° de torsion pour faire équilibre à la force répulsive à la distance de 17°. Pour approcher l'aiguille à la distance de 12°, il fallut tourner la pièce supérieure de cinq circonférences, soit de 2880°, ce qui donna une torsion totale de 12° + 2880° + 12° × 35 = 3312°.

Ainsi les forces de torsion qui font respectivement équilibre aux forces répulsives sont à la distance de

24°	—	—	—	864°	de torsion.
17°	—	—	—	1692°	»
12°	—	—	—	3312°	»

Les résultats sont très-approximativement ceux que doit donner la loi de l'inverse du carré des distances pour l'intensité de la force répulsive. En effet, en partant de la force 3312°, les autres devront être, d'après cette loi,

$$3312^\circ \frac{(12)^2}{(17)^2} \text{ et } 3312^\circ \frac{(12)^2}{(24)^2}; \text{ ou}$$

1650 et 828, au lieu de 1692 et 864 que l'expérience donne. Ces différences sont très-légères, si l'on considère qu'une erreur d'un seul degré sur la position observée de l'aiguille mobile en fait une de 35° pour la force, puisque la force directrice est de 35° pour chaque degré d'écart du méridien magnétique. D'ailleurs il faut remarquer que l'action mutuelle des deux aiguilles aimantées n'étant pas toute concentrée en deux points uniques situés sur chacune d'elles, la variation dans la distance en établit une dans la position relative des points agissants, et que, à mesure que la distance augmente, il y a plus de points qui peuvent agir mutuellement les uns sur les autres. Aussi trouve-t-on la force un peu plus grande, lorsque la distance augmente, qu'elle ne devrait l'être d'après la loi. On opérerait de même pour démontrer que la loi existe également pour les attractions; il faudrait seulement mettre en regard les pôles de nom contraire des deux aiguilles, et avoir soin de placer d'a-

vance l'aiguille mobile, au moyen de la torsion, à une distance considérable de l'aiguille fixe.

Voyons maintenant comment Coulomb se servit de la seconde méthode.

L'aiguille d'épreuve était un fil d'acier du poids de 3,75 grammes, fortement aimanté et suspendu à un fil de soie sans torsion. Cette aiguille faisait 15 oscillations par minute sous l'influence du magnétisme terrestre. Coulomb plaça ensuite verticalement, dans le plan du méridien magnétique, un fil d'acier aimanté de 60 centimètres de longueur environ, eu ayant soin que le pôle nord fût tourné vers le bas, le pôle sud du fil étant en face du pôle nord de l'aiguille d'épreuve, mais à des distances variables. Le centre de l'action attractive de ce pôle devait se trouver dans le plan horizontal de l'aiguille d'épreuve, condition nécessaire pour que l'aiguille ne risquât pas de s'incliner, soit au-dessous, soit au-dessus de ce plan. Aussi fallait-il pour cela placer l'extrémité sud du fil d'acier aimanté à 30 millimètres environ au-dessus de ce même plan. Les choses étant ainsi arrangées, à 4 pouces de distance du fil, l'aiguille faisait 41 oscillations par minute au lieu de 15; à 8 pouces, elle en faisait 24; à 16 pouces, elle en faisait 17.

D'après la loi du pendule, que nous avons rappelée être applicable au cas actuel, on a, en appelant m la force du magnétisme terrestre, m' celle qui agit sur l'aiguille à la distance de 4 pouces et m'' celle qui agit à la distance de 8 pouces.

$$\frac{m'}{m}=\frac{(41)^2}{(15)^2}, \qquad \frac{m''}{m}=\frac{(24)^2}{(15)^2}.$$

Mais, pour avoir la loi de l'action seule de l'aimant sur l'aiguille mobile, il faut retrancher de m', m'', forces totales qui agissent sur cette aiguille, m la force du magnétisme terrestre; les différences $m'-m$, $m''-m$ expriment bien l'action unique de l'aimant aux distances respectives de 4 pouces et de 8 pouces. Or, on déduit des deux proportions qui précèdent :

$$\frac{m'-m}{m''-m}=\frac{(41)^2-(15)^2}{(24)^2-(15)^2}=\frac{1456}{351}=4'',1.$$

Ainsi la force qui agit à 4 pouces, c'est-à-dire à une certaine distance, est *quadruple* de celle qui agit à une distance *double*.

On trouverait pour la distance de 16 pouces $(17)^2 - (15)^2 = 64$, nombre un peu trop petit, car $\frac{1456}{64} = 22\ 3\frac{3}{4}$ et on devrait trouver 16. Cet écart provient de ce qu'à la distance de 16 pouces, le pôle nord inférieur de l'aimant fixe agit sur le pôle nord de l'aiguille mobile, et diminue par son effet répulsif l'action attractive du pôle sud qui est en haut; c'était en vue d'éviter cet inconvénient qu'on avait donné une longueur considérable à l'aimant vertical; mais cette précaution qui atteint son but, ainsi qu'il est facile de le concevoir, quand l'aiguille mobile n'est pas trop éloignée, ne suffit plus dès que la distance dépasse une certaine limite.

En résumé, on peut conclure de l'emploi des deux méthodes également, *que les attractions et les répulsions magnétiques sont en raison inverse du carré de la distance.*

§ 4. Distribution du magnétisme dans un barreau aimanté.

Les deux mêmes méthodes que nous venons d'employer pour trouver la loi de l'inverse du carré vont nous servir aussi à déterminer la distribution du magnétisme dans un barreau aimanté.

On peut déjà par un moyen très-simple constater l'inégalité de cette distribution; il suffit pour cela de tenir un barreau aimanté dans une position horizontale, et de promener sous sa surface inférieure, et dans toute sa longueur, un morceau de fer doux qui porte par trois ou quatre cordons un petit bassin de balance. On s'assure bien vite que le poids qu'il faut mettre dans le bassin pour détacher le fer doux varie beaucoup avec la position du point de l'aimant qui agit sur le fer; d'où l'on conclut que la force magnétique, que l'on peut regarder comme proportionnelle au poids, est très-inégalement répartie. Ainsi, elle est à son maximum, à deux points distants de quelques millimètres des deux extrémités du barreau; à partir de ces points elle va en diminuant très-rapidement, soit dans l'intervalle qui les sépare, soit de chacun d'eux à l'extrémité même du barreau. La manière dont la limaille de fer se distribue autour

du barreau, quand elle est attirée par lui, confirme ce résultat. On la voit, en effet, s'accumuler en grande proportion autour des pôles desquels elle semble converger de toutes parts, comme vers des centres d'action (fig. 76). La partie centrale du barreau n'at-

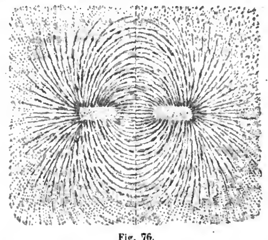


Fig. 76.

tire qu'un très-petit nombre de particules de fer; il arrive même quelquefois qu'elle n'en attire point. Cependant, si le barreau n'est pas très-long, la limaille se distribue autour de cette partie centrale en décrivant des espèces de courbes qui vont d'un pôle à l'autre, et en formant comme des ellipses ayant pour axe celui du barreau, et pour sommets ses deux pôles. Il faut, pour mettre en évidence ces figures, projeter, sous forme de pluie, de la limaille de fer sur une feuille de carton blanc ou sur une lame de verre qui recouvre un barreau aimanté; au moyen de petites secousses imprimées au carton, on facilite l'arrangement de la limaille et la formation des figures. M. de Haldat a réussi à fixer ces figures, qu'il a nommées *fantômes magnétiques :* dans ce but, il applique sur une lame de verre sur laquelle la figure est formée une feuille de papier tendu, imprégné de colle d'amidon préparée à la gélatine; la poudre de limaille de fer se trouve ainsi fixée telle qu'elle était distribuée sur le verre. On peut donc étudier plus facilement cette distribution dans tous ses détails. M. de Haldat a ainsi constaté que les centres d'où par-

tent les lignes rayonnantes sont bien les pôles de l'aimant, qui eux-mêmes sont dépourvus de la limaille de fer. La disposition des courbes elliptiques formées par la limaille est telle que, divergentes à leur origine, elles ne sont jamais distinctes et séparées dans toute leur étendue. Au contraire, elles se réunissent après leur naissance et forment des espèces de mailles. M. de Haldat a encore étudié les fantômes magnétiques produits par deux aimants placés l'un par rapport à l'autre, de diverses manières, et il estime que cette étude peut conduire à des résultats importants sur l'état du magnétisme dans les corps, sur sa puissance et sa distribution. Nous verrons plus tard l'importance qu'y attache M. Faraday.

Déjà, avant M. de Haldat, les courbes magnétiques avaient fixé l'attention de plusieurs savants; sans compter la description qu'en fait Lucrèce[1], Musschenbroek, Lambert, qui avait réussi à donner l'équation de ces courbes, Playfair et Leslie s'en sont successivement occupés. Le docteur Roget a simplifié les méthodes décrites par ses devanciers, et a indiqué des procédés faciles pour tracer graphiquement ces courbes. Voici les principales propriétés de ces courbes engendrées par l'action simultanée, contraire ou semblable, des deux polarités des aimants sur des parcelles de fer doux ou sur des aimants infiniment petits :

1° La différence des cosinus des angles formés avec l'axe du

[1] « Fit quoque, ut a lapide hoc ferri natura recedat
Interdum ; fugere, atque sequi consueta vicissim,
Exsultare etiam Samothracia ferrea vidi ;
Ac ramenta simul furere intus ahenis
In scaphiis, lapis hic magnes quum subditus esset ;
Usque adeo fugere a saxo gestire videtur
Ære interposito ; discordia tanta creatur :
Propterea, quia nimirum prius æstus ubi æris
Præcepit ferrique vias possedit apertas ;
Posterior lapidis venit æstus et omnia plena
Invenit in ferro ; neque habet quâ tranet, ut ante ;
Cogitur obsensare igitur pulsareque fluctu
Ferrea textu suo, quo pacto respuit ab se,
Atque per æs agitat sine eo quod sæpe resorbet. »
De Rerum Naturâ, VI, 1051-54. Edit. de Wakefield.

barreau aimanté par des lignes qui joignent un point quelconque de la couche avec ces deux pôles, est une quantité constante, ces deux angles étant pris du même côté.

2° Une tangente menée à un point quelconque de la courbe coupe le prolongement de l'axe de l'aimant qui la produit, en un point tel que sa distance au pôle le plus voisin est à la longueur absolue de l'aimant, comme le cube de la distance du point de tangence à ce même pôle est à la différence des cubes de ses distances aux deux pôles.

3° Les sinus des angles formés par cette tangente avec les droites, qui mesurent ces distances aux deux pôles, sont entre eux comme les carrés de ces distances.

Le docteur Roget a décrit un instrument propre à tracer ces courbes d'un mouvement continu, et fondé sur le premier des énoncés précédents. Il a aussi fait connaître le procédé suivant, à l'aide duquel on les décrit par points :

De chaque pôle comme centre et avec des rayons de grandeur arbitraire, on trace deux circonférences. Après avoir prolongé l'axe de l'aimant jusqu'à leur rencontre, on le partage en un nombre quelconque de parties égales, et on projette perpendiculairement chacun des points de division sur les circonférences. Par le centre de chaque circonférence, et les points qu'on a déterminés sur elle, on mène des rayons indéfiniment prolongés. Ces rayons se coupent mutuellement en des points qui appartiennent aux courbes cherchées.

Si les deux pôles générateurs sont hétérogènes, les courbes sont dites *convergentes*, et sont les diagonales curvilignes, dans le sens de l'axe aimanté, des intervalles quadrilatères formés par les intersections des rayons. Si les deux pôles sont homogènes, ces courbes se nomment *divergentes*, et leur direction se détermine par celle des diagonales curvilignes perpendiculaires aux premières, et par conséquent à l'axe qui joint les pôles[1].

Mais revenons à l'emploi des deux méthodes qui nous donneront des résultats plus précis. Avec la balance de torsion, Cou-

[1] Voyez, pour les développements mathématiques, la note D à la fin du volume.

lomb se servit des deux mêmes aiguilles aimantées, l'une fixe, l'autre mobile, au moyen desquelles il avait déterminé la loi de l'inverse du carré; il faisait glisser la fixe derrière une mince règle de bois, qui la séparait de la mobile, en ayant soin qu'elle restât verticale. Puis, il notait la torsion qu'il était nécessaire de donner au fil de suspension, pour obliger l'extrémité de l'aiguille mobile à rester dans le plan du méridien magnétique et presque en contact avec la fixe, dont elle n'était séparée que par l'épaisseur de la règle de bois. En opérant de cette manière, Coulomb évitait l'effet sur l'aiguille mobile des points, autre que celui qui était dans le même plan horizontal qu'elle; il n'avait pas non plus besoin de tenir compte de la force directrice de la terre, puisque l'aiguille restait dans le méridien magnétique. Les angles de torsion nécessaires pour les maintenir représentaient donc, dans chaque cas, exactement la force magnétique du point agissant de l'aiguille fixe.

Dans la seconde méthode, Coulomb faisait osciller l'aiguille d'épreuve devant les différentes parties d'un long barreau aimanté qu'il faisait glisser verticalement, de façon que tous ses points se trouvassent successivement dans le plan horizontal de l'aiguille et à la même distance. Appelant m', m'', m''' l'action totale exercée sur l'aiguille quand elle est successivement devant chacun des points du barreau, m étant toujours celle du magnétisme terrestre, et n', n'', n''', le nombre des oscillations faites par l'aiguille d'épreuve devant chacun de ces points, n étant ce nombre d'oscillations, quand le magnétisme terrestre agit sur l'aiguille, on a $\frac{m'}{m}=\frac{n'^2}{n^2}$; $\frac{m''}{m}=\frac{n''^2}{n^2}$; $\frac{m'''}{m}=\frac{n'''^2}{n^2}$;

d'où

$$\frac{m'-m}{m''-m}=\frac{n'^2-n^2}{n''^2-n^2};\quad \frac{m'-m}{m'''-m}=\frac{n'^2-n^2}{n'''^2-n^2}.$$

Or $m'-m$, $m''-m$, $m'''-m$, représentent les forces magnétiques émanées respectivement de chaque point de l'aimant, puisque ces quantités sont l'action totale diminuée de celle du magnétisme terrestre; et on peut les comparer entre elles, une fois que par expérience on a déterminé n, n', n'', n''', etc.

Voici un tableau des résultats obtenus par Coulomb avec un

fil d'acier de 73 centimètres de longueur et de 4, 5 millimètres de diamètre.

L'aiguille d'épreuve faisait, avant qu'on lui présentât le fil d'acier, une oscillation dans une minute, soit 60″.

Elle a fait devant l'extrémité du fil			64 oscillations en 60″		
Devant la même extrémité abaissé de		13 mill. 5	58	—	—
—	—	27	44	—	—
—	—	54	18	—	—
—	—	81	12	—	—
—	—	122	1 à 2	—	—

Ainsi; à partir du point situé de 110 à 120 millimètres au-dessous de son extrémité, l'aiguille d'acier ne présentait pas de force magnétique sensible. En continuant d'abaisser l'aiguille, on trouva que l'absence presque complète d'action durait jusqu'à une distance de 110 à 120 millimètres environ de l'autre extrémité. Mais à partir de cette distance, les mêmes effets se reproduisirent dans un ordre inverse, et l'aiguille d'épreuve fit une pirouette pour présenter son autre pôle à l'action du fil d'acier dont le second pôle également commençait à agir sur elle.

On peut, par l'emploi de cette méthode, constater facilement la présence de points conséquents ou de pôles intermédiaires dans la portion d'un fil ou d'un barreau aimanté comprise entre ses deux points extrêmes ; on peut même déterminer l'intensité des forces magnétiques dont ils sont doués. Quant à l'intensité des forces qui émanent des extrémités mêmes du fil aimanté, il faut, pour en avoir la véritable expression, doubler le résultat obtenu, car l'effet serait évidemment, pour ces points extrêmes, double de ce qu'il est réellement, si l'aimant se prolongeait au delà et présentait en dehors des points aussi efficaces que ceux qui sont en dedans, comme cela a lieu pour les autres parties du barreau.

Coulomb a réussi à représenter géométriquement tous les résultats qu'il a obtenus en élevant, sur chacun des points d'une ligne horizontale figurant un fil aimanté, des perpendiculaires de longueurs proportionnelles aux intensités obtenues par l'expérience. Les extrémités de ces perpendiculaires forment

une courbe qui, dans l'expérience que nous avons rapportée plus haut, se confond avec l'axe du fil de 73 centimètres sur une longueur de 49 environ, et va en s'éloignant rapidement de cet axe à partir du 12me et du 61me centimètre jusqu'aux extrémités, où elle atteint son maximum (fig. 77).

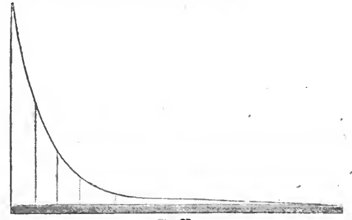


Fig. 77.

Il est assez remarquable que cette courbe, ou, ce qui revient au même, la distribution du magnétisme qu'elle représente, soit exactement la même pour des fils ou des lames de longueurs différentes, pourvu que la longueur surpasse 20 centimètres ; il n'y a d'autre différence, sinon que l'espace laissé au milieu, où le magnétisme est sensiblement nul, est plus ou moins long. Il résulte encore de là que tous les aimants de même force et d'une longueur supérieure à 20 centimètres ont leur pôles à la même distance des extrémités; cette distance est de 4 centimètres environ d'après les calculs de Coulomb. Le même physicien a trouvé que quand les aimants sont trop courts, leurs pôles sont à peu près au tiers de leur demi-longueur à partir de leurs extrémités; ainsi pour une aiguille de 9 centimètres, les pôles seront à une distance des extrémités de 15 millimètres au moins.

Tous ces résultats ne se vérifient que sur des aimants dont la longueur est très-grande par rapport à leurs dimensions transversales, dont la forme est parfaitement régulière, telle que la

forme cylindrique ou rectangulaire, et qui sont aimantés d'une manière normale. Avec les aiguilles en forme de losange, les pôles sont beaucoup plus éloignés des extrémités; dans ce cas comme dans les autres, il faut se servir, pour déterminer leur position, de l'aiguille d'épreuve; le calcul ne peut y conduire *à priori*.

M. Becquerel a cherché, au moyen de la balance de torsion, à déterminer la distribution du magnétisme dans des fils d'acier excessivement fins; il obtenait ces fils en tirant à la filière un cylindre d'acier d'un petit diamètre qu'il avait logé dans l'axe d'un cylindre d'argent dix fois plus gros. Puis après avoir obtenu un fil d'argent très-fin, ayant pour axe un fil d'acier presque capillaire, il dissolvait l'argent dans le mercure, qui n'attaque point l'acier, et obtenait un fil d'acier presque microscopique. Les fils ne sont pas susceptibles d'acquérir une forte aimantation; toutefois ils sont suffisamment aimantés pour qu'on puisse constater que la distribution de leur magnétisme suit à très-peu près la loi déduite des observations de Coulomb. M. Becquerel a trouvé que dans un fil de 1/75 de millimètre de diamètre et de 128 de longueur, les pôles étaient situés à 8,5 millimètres des extrémités. On aurait pu croire qu'ils auraient été aux extrémités mêmes, ce qui arriverait probablement si le fil ne se composait que d'une rangée de particules consécutives, cas idéal qu'il est impossible de réaliser.

M. Kupffer a remarqué, au moyen d'expériences très-délicates faites par la méthode des oscillations, qu'il existe sur un barreau aimanté un point qui n'exerce absolument aucune action sur l'aiguille et qu'il a nommé *point d'indifférence*. La position de ce point est influencée d'une manière très-prononcée par le magnétisme terrestre, quand le barreau n'est pas très-fortement aimanté. Si ce barreau est disposé verticalement, son pôle nord étant en bas, on trouve le point d'indifférence plus près du pôle nord que de l'autre. Si l'on retourne le barreau, le point d'indifférence se rapproche du milieu. Dans le premier cas, le pôle nord du barreau était plus fort que le pôle sud. Dans le second cas, les deux pôles arrivaient peu à peu à avoir la même puissance. Il résulterait de là que le point d'in-

différence serait toujours plus rapproché du pôle le plus fort, et que le genre d'influence du magnétisme terrestre que nous venons de signaler consisterait simplement à déterminer une intensité plus grande dans l'un des pôles que dans l'autre. Le même effet se fait remarquer sur un aimant horizontal ; son pôle nord est plus fort que son pôle sud, quand il est dans sa direction naturelle.

L'élévation de température diminue l'intensité magnétique d'un barreau, comme nous l'avons vu. M. Kupffer s'est assuré qu'elle modifie également, dans ce barreau, la distribution du magnétisme. Le déplacement du point d'indifférence est surtout sensible quand on ne chauffe qu'un des pôles. Le point d'indifférence s'éloigne du pôle chauffé, qui devient également plus faible.

Il semblerait résulter des observations de M. Kupffer que l'intensité relative des deux pôles est la cause unique qui exerce une influence sur la distribution du magnétisme, et que ce n'est que parce qu'elles modifient cette intensité relative, que diverses circonstances, telles que le magnétisme terrestre et la variation de la température, font éprouver un changement de place au point d'indifférence. Enfin, on serait porté à croire que, si le point d'indifférence ne reste pas au milieu d'un barreau, mais se porte du côté le plus fort quand les deux extrémités n'ont pas la même puissance magnétique, cela tient à ce que les sommes de toutes les forces opposées devant toujours être séparément égales l'une à l'autre, cette condition ne peut être remplie qu'autant que les points d'où émanent les plus faibles sont plus nombreux que les points d'où émanent les plus intenses, et par conséquent que la portion de l'aiguille dont l'extrémité a le plus de magnétisme est plus courte que la portion dont l'extrémité en a moins.

§ 5. Théorie des fluides magnétiques et de la force coercitive.

Le genre de considérations que nous venons d'aborder nous amène à nous occuper de la théorie du magnétisme, sujet que les travaux de Coulomb, suivis des recherches mathématiques de Poisson, semblaient avoir épuisé, quand les découvertes dont

nous parlerons dans le chapitre suivant sont venues, sinon renverser totalement, du moins modifier considérablement les idées théoriques de ces deux savants. Toutefois leur théorie est trop importante et encore trop répandue pour que nous puissions la passer sous silence. Les faits remarquables sur lesquels elle repose, le besoin qu'on a de la connaître pour comprendre celle qu'on lui a substituée, et qui a un grand nombre de points communs avec elle, en rendent d'ailleurs l'exposition indispensable, lors même qu'on serait obligé de l'abandonner plus tard.

Dès qu'on aborde l'étude des phénomènes magnétiques, on est frappé de l'analogie qu'ils présentent avec les phénomènes électriques; on est donc bien vite tenté de les attribuer à deux fluides magnétiques jouissant de propriétés du même genre que celles dont jouissent les deux fluides électriques : l'un, *le fluide magnétique nord*, serait la cause des effets que produit le pôle nord d'un aimant; l'autre, le *fluide sud*, des phénomènes que présente le pôle sud de l'aimant. Les fluides de même nom se repousseraient, ceux de nom contraire s'attireraient. L'analogie toutefois n'irait pas plus loin, car l'expérience a montré que les fluides magnétiques et les fluides électriques n'exercent mutuellement aucune influence les uns sur les autres; de plus, les fluides électriques peuvent se manifester sur tous les corps de la nature, tandis que les fluides magnétiques ne sont sensibles que sur un très-petit nombre de corps.

Une expérience importante montre, en outre, que les deux fluides magnétiques ne sont point dans un barreau aimanté distribués de la même manière que le sont les deux fluides électriques dans un corps conducteur isolé; leur distribution semblerait au contraire avoir beaucoup plus d'analogie avec celle qu'affectent les deux électricités dans un corps isolant dont les particules successives sont polarisées, ainsi que l'ont démontré les recherches récentes de Faraday. Voici cette expérience : on a une aiguille aimantée cylindrique, d'un bon acier bien trempé et qui ne présente aucun point conséquent; on s'assure que chacune de ses moitiés possède un magnétisme contraire. On la rompt au milieu; chaque moitié semble devoir ne posséder qu'un des deux magnétismes après la rupture aussi bien

qu'avant; il n'en est point ainsi : chacune des moitiés est devenue un aimant parfait, ayant ses deux pôles et son point d'indifférence au milieu. La moitié qui se terminait par un pôle nord a pris un pôle sud, et celle qui se terminait par un pôle sud a pris un pôle nord également à sa nouvelle extrémité; en sorte qu'au point de rupture sont nés deux pôles contraires. On peut encore rompre par le milieu chacun des deux premiers fragments devenus des aimants, et on produit ainsi quatre nouveaux aimants parfaitement semblables, sauf pour les dimensions, aux précédents. Ces derniers peuvent être encore brisés de même; et cette opération, poursuivie jusqu'aux dernières limites d'une division mécanique possible, donne toujours, quelque petit que soit le fragment qu'on obtient, un aimant ayant des pôles contraires et doué de toutes les propriétés d'un aimant plus considérable.

Il faut nécessairement conclure de cette expérience curieuse que les deux magnétismes se retrouvent également dans toutes les particules. On est donc conduit à admettre que chaque particule d'un corps magnétique contient, en proportion égale, les deux magnétismes; qu'à l'état naturel ces deux magnétismes se neutralisant l'un l'autre, il n'y a aucune action entre eux, mais que l'aimantation les sépare sans que pour cela ils sortent de la particule qui les contient; seulement tous les magnétismes d'une espèce sont portés vers un côté de la particule, et tous les magnétismes de l'autre espèce sont portés vers l'autre côté. Qu'on suppose une file, soit une rangée de particules placées les unes à la suite des autres en ligne droite; on promène le long de cette rangée le pôle nord d'un aimant; ce pôle décompose successivement le magnétisme naturel de chacune des particules sur lesquelles il passe; il attire le magnétisme sud dans l'extrémité de la particule dirigée du côté vers lequel il chemine, et repousse le magnétisme nord dans l'extrémité opposée. De cette façon, chaque particule a un pôle sud tourné dans la direction que suit l'aimant qu'on promène, et un pôle nord tourné de l'autre. Il se trouve finalement un pôle sud du côté extérieur de la dernière particule touchée par l'aimant, et un pôle nord du côté extérieur de la première.

Ces deux pôles seront les seuls agissants, car les magnétismes contraires de toutes les particules intermédiaires se dissimuleront mutuellement quoiqu'ils soient dans des molécules différentes (fig. 78); s'ils étaient dans la même, ils se neutralise-

N (N S) (N S) (N S) (N S) (N S) (N S) (N S) (N S) (N S) (N S) S

Fig. 78.

raient. L'expérience dans laquelle on brise un aimant est la preuve qu'ils ne sont que dissimulés; les deux pôles qui apparaissent sont dus aux magnétismes contraires qui se trouvaient dans les extrémités en regard des particules contiguës que la rupture vient de séparer. S'ils avaient été neutralisés et non simplement dissimulés, ces magnétismes n'auraient pas été mis en liberté par la séparation des deux particules. La nature des deux pôles qui se manifestent aux points de rupture des deux fragments est parfaitement d'accord avec la théorie, ainsi que la figure le met en évidence. Cette propriété que nous attribuons aux deux magnétismes, de pouvoir se dissimuler sans se neutraliser, peut se prouver directement par l'expérience. Il suffit, pour cela, de suspendre un objet quelconque en fer doux, par exemple une clef, à l'un des pôles d'un barreau aimanté, et d'approcher par-dessus le pôle opposé d'un barreau semblable. Au moment où le contact entre les deux pôles contraires a lieu, et quelquefois même un peu avant, l'objet en fer suspendu tombe tout d'un coup, et il est impossible de le faire tenir de nouveau tant que les pôles opposés des deux barreaux sont en contact, preuve que l'action de l'un est dissimulée par l'autre; en effet, dès qu'on les sépare, ils reprennent chacun leur énergie propre.

Toutefois une cause qui, en modifiant sensiblement la distribution du magnétisme libre, influe sur la place même des pôles, c'est l'action mutuelle que les deux pôles de nom contraire peuvent exercer l'un sur l'autre, et qui devient sensible à cause de leur peu d'éloignement dans les aimants très-courts. Cette action recompose une grande partie du magnétisme développé par l'aimant extérieur dans l'acte de l'aimantation; aussi voit-on que la quantité de magnétisme libre est beaucoup

moindre dans les fils aimantés courts que dans les longs. Cette réaction des pôles contraires l'un sur l'autre n'est plus sensible, il est vrai, dans les aimants dont la longueur est très-grande; mais elle s'exerce alors sur les portions intermédiaires, et tend à développer leurs magnétismes naturels, comme le ferait un aimant extérieur. De là résultent les points conséquents qui se forment ainsi d'eux-mêmes dans de très-longs morceaux d'acier, dès qu'on les a soustraits à l'influence des barreaux qui les aimantent.

Le cas d'une simple rangée de particules n'est qu'un cas théorique; on peut en approcher en employant des fils d'acier très-fins, comme l'a fait M. Becquerel, mais on ne le réalise jamais complétement. En fait, un aimant est une réunion d'un plus ou moins grand nombre de files semblables de particules, files qui seraient parallèles entre elles dans un aimant cylindrique et prismatique parfait. Les pôles de l'aimant qui sont les points d'application des résultantes de toutes les forces émanées des pôles situés aux extrémités de ces rangées parallèles devraient, dans ce cas, se trouver aux extrémités mêmes du barreau. Mais ce résultat ne se réalise jamais complétement, parce que, par l'effet de la structure moléculaire du métal, les files des particules ne sont pas parfaitement parallèles; parce que, en outre, elles ne se prolongent jamais toutes également jusqu'au bout. Ce dernier cas se présente surtout dans les aiguilles dont la forme n'est pas celle d'un prisme ou d'un cylindre; dans celles en losange, en particulier; il est évident que la résultante des forces émanées des extrémités de chaque filet ne peut avoir son point d'application à l'extrémité de l'aiguille, mais qu'elle l'a nécessairement en un point plus rapproché du centre. Nous verrons plus loin que la différence que nous venons de signaler entre le résultat de la théorie et celui de l'observation tient encore à d'autres causes d'un ordre plus important, relatives à l'état magnétique des portions intérieures d'un aimant.

La théorie du magnétisme que nous venons d'exposer suppose implicitement l'existence d'une force qu'on a appelée *coercitive*. Elle serait analogue à ce qu'est, dans l'électricité, la force isolante qui maintient, dans un corps dont les particules sont polarisées, les deux électricités séparées, comme

cela a lieu dans l'expérience que nous avons citée de M. Matteucci, pour une pile formée de plusieurs lames de mica superposées, qui, lorsqu'on les sépare, se trouvent électrisées en plus sur l'une de leurs faces, et en moins sur l'autre. La force coercitive est donc celle qui maintient dans chaque particule les deux magnétismes séparés, en les empêchant d'obéir à leur attraction mutuelle. Cette même force doit également s'opposer à leur séparation, c'est donc elle que doit combattre l'aimantation. Aussi remarque-t-on que ce sont les corps les plus difficiles à aimanter, tels que l'acier trempé, qui conservent le mieux l'aimantation qu'on leur a imprimée, tandis que ceux qui, comme le fer doux, s'aimantent très-facilement, perdent aussi immédiatement leur magnétisme. Les premiers ont une force coercitive considérable, les seconds en ont une très-faible ou à peu près nulle. Cette différence peut être mise en évidence par une expérience très-simple. On suspend au pôle d'un aimant, par une de ses extrémités, un fil de fer doux, on trouve aussitôt à l'autre extrémité un pôle capable d'attirer de la limaille de fer; qu'on coupe le fil de fer tout en le laissant suspendre à l'aimant, à une petite distance de ce pôle, le fragment détaché n'a plus, ni à l'une ni à l'autre de ses extrémités, aucune trace de magnétisme. Avec un fil d'acier le fragment serait un véritable aimant, ayant à chacun de ses deux bouts un pôle différent.

La chaleur détruit la force coercitive, c'est pourquoi les corps aimantés perdent leur magnétisme lorsqu'ils sont poussés à une température élevée; les deux magnétismes se réunissent alors dans chaque particule. Mais s'ils sont sous l'influence du magnétisme terrestre, alors la faiblesse de la force coercitive permet de nouveau la séparation sous cette influence du magnétisme naturel, séparation qui se maintient lorsqu'après le refroidissement cette force est redevenue plus considérable. Æpinus avait également trouvé qu'on peut aimanter fortement une aiguille ou un barreau d'acier en les chauffant au rouge et les laissant refroidir entre les deux pôles contraires de forts barreaux aimantés, qui produisent le même effet que l'action du magnétisme terrestre, même à un degré plus élevé.

Les actions mécaniques ont sur la force coercitive la même influence que la chaleur. C'est pourquoi elles facilitent l'aimantation, ainsi que nous en avons déjà vu de nombreux exemples. En voici un nouveau de M. de Haldat. Des fils de fer non recuits, d'un décimètre de longueur et d'un millimètre de diamètre, avaient été placés horizontalement entre deux barreaux dont les pôles contraires étaient tournés vers les bouts des fils, mais à une distance trop grande pour pouvoir les aimanter par leur influence. Toutefois, dès qu'on les frottait dans la direction des pôles avec des corps durs, ils acquéraient une polarité magnétique prononcée sous cette même influence.

Voici par contre un cas où les actions mécaniques opèrent la désaimantation. M. de Haldat a réussi, en promenant le pôle d'un aimant sur des lames d'acier et même sur des plaques de tôle, à y déterminer, par l'aimantation, des figures qui deviennent visibles, quand on répand de la limaille de fer sur la surface des lames et des plaques et qu'on les frappe doucement. Les parcelles de fer s'accumulent vers les limites du trait, en laissant à nu l'intervalle qui en marque l'épaisseur, de sorte qu'elles se trouvent rassemblées sur les lignes qui séparent les parties aimantées de celles qui ne le sont pas. Le magnétisme qui est ainsi développé par une simple friction, ou même par la simple approche d'un barreau, persévère très-longtemps. Pour le faire disparaître, on n'a qu'à frapper les plaques fortement pendant une ou deux minutes sur un madrier avec un petit maillet de bois, ce qui excite chez elles des vibrations réitérées et violentes. Il va sans dire qu'on obtient le même effet en chauffant les plaques; il suffit d'élever leur température jusqu'au jaune paille. Si l'on aimante une cartouche faite de limaille de fer très-fine, elle peut garder assez longtemps son magnétisme, mais elle le perd immédiatement dès qu'on agite les particules de la limaille. Cette dernière expérience semblerait prouver que l'aimantation et la désaimantation seraient liées avec une changement dans la position relative des particules du corps aimanté; elle expliquerait ainsi l'effet de la chaleur et de l'action mécanique, qui faciliteraient aux particules le retour à leur position naturelle que l'aimantation aurait

altérée. La force coercitive ne serait, dans cette manière d'envisager le phénomène, que la résistance plus ou moins grande des particules à une modification dans leur arrangement mutuel tel qu'il constitue la structure naturelle du corps. Nous verrons dans le chapitre troisième où nous nous occuperons de nouveau de l'aimantation, que des faits d'un ordre différent sont tout à fait favorables à cette opinion.

Enfin pour compléter la théorie nous devons ajouter que l'on peut construire un aimant en suivant les principes sur lesquels elle repose. Il suffit pour cela de couper un grand nombre de petits bouts de fil de fer très-doux, puis de les placer bout à bout à la suite les uns des autres; en présentant le pôle d'un aimant à l'une des extrémités de cette rangée, on voit tous les fragments qui la composent adhérer fortement les uns aux autres; et à l'autre extrémité il naît un pôle de même nom que celui de l'aimant qu'on a approché. En un mot, la rangée possède toutes les propriétés d'un véritable aimant. Mais sitôt qu'on éloigne le pôle qui produisait cet effet, toute trace de magnétisme disparaît et les petits fragments se détachent tous les uns des autres; résultat qui provient de l'absence de force coercitive dans le fer doux et de ce que par conséquent dès que la cause qui les a séparés n'est plus là, les magnétismes contraires de chaque particule se neutralisent mutuellement immédiatement. Ce qui se passe dans chaque fragment, a lieu de même dans chaque particule individuelle d'un corps qui est aimanté.

Quelques physiciens avaient admis dans le magnétisme comme dans l'électricité l'hypothèse d'un seul fluide. Æpinus, en la soumettant au calcul, avait trouvé que, pour être d'accord avec les faits, il fallait qu'elle remplît les conditions suivantes :

1° Que les particules du fluide magnétique unique se repoussent avec une force inverse du carré de la distance ;

2° Que les particules de ce fluide attirent celles du fer et soient attirées par elles de même ;

3° Que le fluide magnétique puisse se mouvoir dans les pores du fer et de l'acier doux sans difficulté et qu'au contraire ce mouvement surmonte des obstacles dans l'acier dur et trempé;

4° Que les particules du fer se repoussent mutuellement, condition semblable à celle à laquelle conduit pour tous les corps la théorie d'un fluide unique dans l'électricité et qui est inconciliable avec les idées admises sur la constitution de la matière.

§ 6. Des divers procédés d'aimantation, et de la puissance magnétique en général.

Les considérations dans lesquelles nous sommes entrés et les faits que nous avons étudiés, nous permettent de revenir maintenant avec plus de connaissance de cause sur un point important que nous n'avons qu'effleuré; nous voulons parler de l'*aimantation* et de l'influence de diverses circonstances sur l'intensité du magnétisme que les corps sont susceptibles d'acquérir.

Le procédé d'aimantation le plus simple consiste à appliquer les pôles d'un aimant à l'extrémité d'une aiguille ou du barreau qu'on veut aimanter. Les premières particules en contact avec ce pôle ont leur magnétisme naturel décomposé; le magnétisme sud se porte du côté le plus rapproché du pôle nord de l'aimant, et le magnétisme nord du coté le plus éloigné; ce dernier magnétisme décompose à son tour le magnétisme naturel des particules suivantes, et ainsi de suite jusqu'à l'extrémité la plus éloignée du barreau dont les particules se trouvent posséder ainsi extérieurement un magnétisme semblable à celui du pôle aimantant.

Voilà la théorie du procédé; mais le phénomène ne se passe pas toujours aussi simplement. Le docteur Robison, physicien écossais, a observé que lorsqu'au lieu de fer doux on aimante par ce moyen de l'acier, l'acquisition du magnétisme est graduelle et progressive, et que la gradation est d'autant plus sensible que l'acier du barreau sur lequel on opère est plus trempé. Ainsi, quand on applique le pôle nord d'un aimant à l'extrémité d'un barreau d'acier dur, l'extrémité en contact acquiert aussitôt un pôle sud, et l'autre n'est pas d'abord affectée. On observe alors un pôle nord formé à peu de distance du pôle sud, et après celui-ci un second pôle sud très-faible. Ces pôles

avancent graduellement le long du barreau ; à l'extrémité éloignée du contact paraît un faible pôle sud, et ce n'est que longtemps après (si cela arrive jamais) qu'on y trouve un pôle nord simple et vigoureux. Le plus souvent ce pôle nord reste diffus et faible, et même, si le barreau est très-long, il arrive qu'on trouve souvent sur ce barreau une succession de pôles nord sud qui n'avancent jamais assez pour atteindre son extrémité.

Au moyen d'une aiguille d'épreuve, ou en plaçant sur le barreau une feuille de papier saupoudrée de limaille de fer, on s'aperçoit très-bien de cette marche des pôles qui s'opère plus ou moins vite. Si la trempe du barreau n'est pas plus forte que celle des instruments tranchants et si ce barreau n'a que 15 ou 20 centimètres de longueur, la marche de l'aimantation s'arrête au bout de quelques minutes. Quand le barreau est très-dur, on peut accélérer beaucoup les progrès de l'aimantation en le frappant assez fortement pour le faire sonner, simplement avec une clef, surtout s'il est suspendu verticalement. Mais il est rare qu'on obtienne ainsi une aimantation uniforme, qu'il se forme seulement deux pôles et que ces deux pôles soient d'égale force ; celui qui s'est formé à l'extrémité éloignée du point de contact est en général diffus et par conséquent plus faible. Pour aimanter fortement par le simple contact, il faut, lorsque la force coercitive est considérable, placer le barreau entre deux pôles contraires ; l'aimantation se faisant alors à la fois dans deux sens qui concourent au même résultat final, l'opération est plus vite achevée et plus parfaite.

Un second procédé plus énergique que le précédent et qui est plus généralement usité, consiste à promener la pièce d'acier qu'on veut aimanter le long du pôle d'un aimant; nous en avons déja donné la théorie. La force coercitive est plus facilement surmontée dans cette opération où chaque particule de la surface frottée subit à son tour l'influence directe du magnétisme du pôle. Il faut seulement répéter le frottement plusieurs fois, surtout si la force coercitive est grande, mais il faut avoir soin qu'il ait lieu toujours dans le même sens. L'effet de

cette réitération de frottement n'est pas facile à comprendre. En effet, si, après avoir aimanté une aiguille par une première opération, on reporte le pôle de l'aimant à l'extrémité de la première touchée, on commence par détruire le magnétisme qu'on vient de lui donner avant de le lui rendre par un second frottement. Chaque molécule frottée se trouve donc aimantée d'abord dans un sens contraire à celui dans lequel elle l'est ensuite. Pourquoi donc un second frottement augmente-t-il l'effet du premier, un troisième celui du second, et ainsi de suite jusqu'à une certaine limite? Il paraîtrait que le mouvement imprimé en sens alternativement contraires aux deux magnétismes des particules favorise leur séparation, et que la force coercitive cède plus facilement après avoir été déjà plusieurs fois surmontée que lorsqu'elle ne l'a point été encore. Il y a là comme une espece de vibration nécessaire à l'aimantation, et dont l'intensité augmente avec le nombre des frottements. On peut suivre également, dans ce procédé comme dans le précédent, la marche de l'aimantation. En promenant le long d'un barreau le pôle d'un aimant dont la ligne des pôles est perpendiculaire à l'axe du barreau, on voit successivement paraître à l'extrémité touchée la dernière un pôle de même nom et un pôle de nom contraire à celui qu'on promène, et l'inverse a lieu à l'extrémité touchée la première. Les points intermédiaires passent par des états magnétiques très-variables; ces états présentent une foule d'anomalies provenant probablement des différences de constitution moléculaire qui existent entre les divers barreaux soumis à l'expérience et dont deux ne sont jamais identiques.

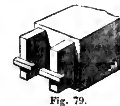
Quand il s'agit d'aimanter très-fortement une aiguille de boussole ou des lames d'une épaisseur qui n'excède pas 4 ou 5 millimètres, il faut disposer aux extrémités de l'aiguille à aimanter deux puissants aimants, de manière qu'ils agissent par leurs pôles opposés sur les deux bouts de cette aiguille. Celle-ci est placée sur les aimants de manière à les dépasser de 20 à 30 millimètres à chacune de ses extrémités. On prend ensuite deux autres barreaux aimantés, et, les tenant chacun d'une main, on touche avec leurs pôles opposés le milieu de l'aiguille,

puis, les inclinant de 25 à 30°, on les fait glisser sous cette inclinaison l'un vers l'une de ses extrémités, l'autre vers l'autre extrémité de l'aiguille. Puis on les rapporte au milieu pour faire la même opération qu'on répète jusqu'à ce que l'aimantation soit devenue suffisamment forte. Il faut avoir soin que le pôle de chaque barreau qui touche l'aiguille soit le même que celui de l'aimant fixe vers lequel on le fait glisser, afin que les deux effets s'ajoutent. Ce procédé, dit de Duhamel ou de la *touche séparée*, ne suffit pas quand les lames à aimanter ont une forte épaisseur ; il faut alors employer celui d'Æpinus, dit de la *double touche*. Il ne diffère du précédent qu'en ce que les deux barreaux qui servent à l'aimantation sont, à partir du milieu de la lame à aimanter, promenés ensemble, et non séparément. On les fait glisser d'abord sur l'une des extrémités, puis on revient tout le long du barreau à l'autre extrémité ; on opère plus ou moins longtemps ces frictions par ce mouvement de *va* et *vient* avec la condition de commencer et de finir toujours au milieu, et d'avoir soin de s'arrêter après avoir passé le même nombre de fois sur chaque partie de la lame à aimanter.

Le procédé de la double touche, tout en produisant une aimantation plus forte, et précisément, ainsi que nous l'avons vu, parce que cette aimantation est trop forte et détermine ainsi une réaction des pôles sur les parties de l'aimant qui en sont voisines, a l'inconvénient de donner souvent naissance à des points conséquents quand les lames ont une grande longueur et de donner des pôles d'une force inégale. Il vaut donc mieux employer celui de Duhamel de la touche séparée, quand il s'agit d'aiguilles de boussole ou d'aimants destinés à des appareils de précision. Ce procédé est supérieur, même à cet égard, aux deux premiers que nous avons décrits. En effet la présence de points conséquents est très-nuisible à la sensibilité d'une aiguille de boussole; car sa force directrice n'est plus alors que la différence qui existe entre la force avec laquelle sont dirigés par la terre, les deux pôles qui sont à ses extrémités, et celle avec laquelle les deux pôles respectivement opposés à ceux-ci, qui sont du même côté qu'eux, mais plus près du centre, sont

dirigés dans un sens différent. Si les premiers l'emportent, c'est qu'en général ils sont plus forts, c'est aussi qu'ils agissent avec un bras de levier plus long.

Nous n'avons exposé que d'une manière sommaire les différents procédés d'aimantation qui ont été successivement mis en pratique. Un très-grand nombre de physiciens, outre ceux que nous avons nommés, s'en sont occupés; Canton, Mitchell, Antheaume, Savery, ont tous, comme Duhamel, Æpinus, Robison et Coulomb, que nous avons déjà cités, indiqué de nouvelles méthodes ou perfectionné les anciennes. Ne faisant pas ici une histoire de la science, nous ne pouvons entrer dans les détails de ces méthodes et de ces perfectionnements; cependant nous dirons encore un mot des travaux d'un savant qui est particulièrement célèbre par les essais qu'il a faits pour obtenir les aimants artificiels les plus forts possible : c'est le docteur Knight, qui vivait dans le dernier siècle, et dont les recherches datent surtout des années 1766 et suivantes. La société royale de Londres possède un aimant fait par M. Knight, et qui est confié aux soins de M. Christie, dont l'armature exige un poids de 100 livres pour être détachée des pôles. Ce puissant aimant se compose de 450 barreaux aimantés longs de 15 pouces chacun, larges d'un pouce et épais d'un demi-pouce; ils sont fixés dans une boîte, de manière à présenter à une de ses extrémités deux pôles qui en ressortent (fig. 79) horizontalement sur une longueur de 6 pouces, une hauteur de 12 et une largeur de 3. Cet aimant, que le docteur Knight avait mis beaucoup de soins à construire et à maintenir en bon état, et qu'il appelait son réservoir de force magnétique, avait autrefois beaucoup plus de puissance qu'il n'en a maintenant; l'aiguille d'une boussole qui le touchait acquérait une force de polarité si grande qu'elle était en état de détruire toute la polarité des meilleures boussoles qu'on faisait en Angleterre. Un incendie qui eut lieu dans la maison où cet aimant avait été placé après la mort du docteur Knight altéra sa force, et, malgré les efforts qu'on a faits pour le


Fig. 79.

remettre en bon état, il n'a jamais recouvré sa vigueur primitive. Le docteur Knight avait réussi aussi à faire de petits aimants artificiels qui pouvaient porter jusqu'à cent fois leur propre poids. Il avait également cherché à composer des pâtes magnétiques susceptibles d'acquérir un magnétisme plus fort que l'acier. D'après Ingenhousz, la composition qui avait donné les résultats les plus satisfaisants était un mélange de poudre d'un aimant naturel, de poudre de charbon très-fine et d'huile de lin, qu'on avait laissé sécher lentement. Des essais faits par Ingenhousz lui-même lui démontrèrent que les pâtes dans la composition desquelles entrait la poudre de l'aimant naturel étaient très-supérieures à celles préparées avec la poudre de fer, ce qui tient, il est évident, à ce que l'aimant naturel a plus de force coercitive que le fer.

On n'a jamais bien su en quoi consistaient les procédés d'aimantation du docteur Knight. Il est probable qu'il n'avait pas de procédés proprements dits, mais que par tâtonnement, par des soins persévérants et des opérations fréquemment répétées, il parvenait, avec le temps, à donner à ses aimants la puissance extraordinaire qui les a rendus célèbres.

Quel que soit le procédé d'aimantation qu'on emploie, il existe pour chaque barreau ou chaque aiguille une limite de force magnétique qu'on ne peut dépasser une fois qu'elle a été atteinte. On pourra bien développer momentanément une aimantation plus forte; mais, une fois que l'aimantation aura cessé, le magnétisme que le corps conservera diminuera jusqu'à ce qu'il soit arrivé à cette limite qu'on nomme *point de saturation*. Ainsi, une aiguille fait 100 oscillations en 60″; on l'aimante plus fortement, elle les fait en 40″. Au bout d'un ou de plusieurs mois, c'est encore 100 oscillations en 40″ qu'elle fait. On parvient, en employant de puissants moyens pour l'aimanter, à lui faire faire 100 oscillations en 30″; mais, au bout de quelque temps, elle revient à en faire 100 en 40″. Il est évident que ce dernier nombre indique la limite de l'intensité qu'elle est susceptible de conserver; c'est donc son point de saturation, point qui dépend essentiellement de la force coercitive du corps qui est aimanté.

Les corps qu'on a aimantés au delà du point de saturation n'y reviennent pas immédiatement; ce retour n'a lieu quelquefois qu'au bout d'un temps très-long. Il peut être influencé par plusieurs causes extérieures, le changement de température, le voisinage d'autres aimants, l'action de la terre, etc. La saturation n'a pas lieu elle-même à une limite aussi fixe qu'on pourrait le croire. Il se fait souvent dans l'aimant une réaction des fluides nord et sud qui augmente ou diminue l'intensité magnétique. Pour s'assurer qu'un corps est aimanté à saturation, il n'y a qu'à le réaimanter dans le même sens avec des barreaux plus forts que ceux avec lesquels on l'avait aimanté d'abord. Si son magnétisme n'augmente que faiblement, et si cette augmentation disparaît avec le temps, on est assuré qu'on avait atteint par la première opération le point de saturation.

Une précaution importante, c'est de ne réaimanter jamais un corps avec des barreaux plus faibles que ceux que l'on a employés pour l'aimanter d'abord. Non-seulement on n'ajoute rien à sa force, mais au contraire on la diminue en ramenant son magnétisme à celui que lui aurait imprimé, s'ils avaient agi seuls primitivement, les derniers barreaux qu'on a employés. Ce résultat tient à ce que les barreaux qu'on fait glisser n'aimantent qu'en recomposant d'abord et décomposant ensuite le magnétisme de chacune des particules du corps aimanté sur lequel on le promène.

L'action de la terre peut également diminuer le magnétisme des barreaux aimantés à saturation lorsqu'on les frappe en les plaçant dans certaines positions. M. Scoresby a fait sur ce sujet un grand nombre d'expériences curieuses, desquelles il résulte que la terre agit toujours comme un fort aimant dont l'influence peut contre-carrer ou renforcer, suivant la manière dont le corps est placé, le magnétisme déjà acquis. Le même physicien a réussi également à aimanter à saturation des barres d'acier uniquement par l'action du magnétisme terrestre. Il prenait dans ce but deux barres d'acier longues de 30 pouces et larges d'un pouce, puis six autres longues de 8 pouces et larges d'un demi-pouce. Une large barre de fer était frappée dans une position verticale; ainsi aimantée par cette percussion, elle était

posée immédiatement, sans que sa direction fût changée, sur chacune des grandes barres d'acier qu'on frappait en même temps. Puis chacune des petites barres était ensuite placée, aussi verticalement, au sommet d'une des larges et frappée successivement, en quelques instants elles avaient acquis un grand pouvoir de suspension. Enfin les six petites barres étaient ensuite unies successivement deux à deux par leurs pôles opposés, au moyen de petits barreaux de fer doux, et frottées par les autres suivant le procédé de la double touche, et on trouvait à la fin de ces opérations qu'elles étaient aimantées à saturation.

La forme est une circonstance qui influe notablement sur l'intensité du magnétisme qu'un corps est susceptible d'acquérir. Coulomb, ayant découpé dans une même lame d'acier des aiguilles qu'il trempa de la même manière et qu'il aimanta jusqu'à la saturation, trouva que, pour la même épaisseur et le même poids, la forme de flèche est supérieure à la forme rectangulaire. Quant au degré de la trempe, il a trouvé que ce n'est pas la plus forte qui détermine le plus de magnétisme, mais que ce maximum est atteint lorsque l'acier a été recuit jusqu'au rouge sombre.

Quand il ne s'agit pas d'aiguilles de boussoles, mais d'aimants qu'on tient à se procurer aussi forts que possible, on leur donne ou la forme de parallélipipèdes, qui constitue les barreaux aimantés, ou celle de fer à cheval. Dans l'un et dans l'autre cas, mais surtout dans le second, l'aimant ne se compose pas d'une seule pièce, mais de plusieurs semblables qu'on superpose les unes aux autres, en ayant soin que les extrémités qui se recouvrent aient bien les mêmes pôles magnétiques. Le plus souvent on donne à ces pôles superposés des longueurs légèrement différentes, de manière que leurs bouts soient en retrait les uns à l'égard des autres, et que l'aimant se termine en échelons.

On a soin, pour conserver aux barreaux leur magnétisme, de les munir d'armures ou armatures. Ce sont des pièces de fer doux qui sont mises en contact avec les pôles des aimants, pour maintenir leur activité au moyen de pôles contraires qu'y détermine le magnétisme des aimants eux-mêmes. Quand c'est un

aimant en fer à cheval, un seul prisme de fer doux suffit pour réunir les deux pôles; quand ce sont des barreaux, on en met deux ordinairement dans une même boîte, en les plaçant parallèlement et à une petite distance l'un de l'autre, en ayant soin de mettre en regard leurs pôles contraires, et aux deux extrémités on dispose en travers deux petits prismes en fer doux (fig. 80). Ces pièces de fer, soit dans ce cas, soit dans le précé-



Fig. 80.

dent, deviennent des aimants; elles réagissent sur les barreaux et y maintiennent la séparation des magnétismes qui, sans cette précaution, finiraient peu à peu par se combiner en grande proportion et par recomposer ainsi le fluide neutre. Dans les aiguilles de boussole le magnétisme terrestre fait l office d'armature, en maintenant par sa puissance la séparation des deux magnétismes.

Les armatures dans les aimants en fer à cheval portent, en général, un bassin dans lequel on place des poids, en ayant soin de ne jamais dépasser la limite de ceux que peut porter l'armature sans se détacher. Ces poids, qu'on peut augmenter graduellement, entretiennent la force de l'aimant et même tendent à l'accroître, pourvu que l'excès du poids ne devienne jamais tel que l'armure se détache; dans ce cas l'aimant perd subitement une grande partie de sa puissance, et il ne peut la recouvrer que par un nouvel accroissement lent et graduel du poids que son armure peut porter.

Une question intéressante, qui a été étudiée d'abord par Coulomb, plus tard par Nobili, est de savoir quel est l'état magnétique de chacune des lames ou de chacun des fers, dont la réunion forme ce qu'on appelle un faisceau magnétique. Cette détermination semble pouvoir conduire à la connaissance de l'état magnétique des couches intérieures d'une aiguille ou d'un barreau aimanté. Coulomb avait trouvé, au moyen de la balance, que les lames qui formaient les deux surfaces intérieures

du faisceau avaient une force magnétique beaucoup plus grande que les autres; il en avait même trouvé dans l'intérieur qui avaient leurs pôles renversés. Nobili, en se servant de la méthode des oscillations, réussit à déterminer assez exactement l'état magnétique de chacune des aiguilles très-fines et de même longueur, qui, réunies au nombre de cinquante, formaient un faisceau qu'il avait très-fortement aimanté. Il trouva, après avoir défait le paquet, toutes les aiguilles fortement aimantées dans le même sens; puis il reforma le faisceau, en maintenant le contact des aiguilles aussi parfait que possible. Ayant délié le paquet deux heures après, il trouva que plusieurs des aiguilles avaient acquis un magnétisme contraire; ayant fait la même expérience avec un autre paquet et l'ayant défait une demi-heure après l'avoir aimanté, il trouva qu'un certain nombre d'aiguilles avaient perdu tout leur magnétisme. Il résulte de ces faits que les aiguilles les plus fortes désaimantent les plus faibles et leur donnent même un magnétisme contraire et que, si elles avaient reçu dans l'origine le même degré d'aimantation, la vertu magnétique se serait bien vite éteinte dans tout le système.

Ces expériences ont conduit Nobili à conclure qu'on ne doit pas considérer, comme nous l'avons fait plus haut, un barreau aimanté, comme formé par un faisceau de filets de même longueur, aimantés au même degré, tous dans le même sens, car alors tout le système se désaimanterait bien vite. Il suppose que l'intérieur du barreau est divisé en couches concentriques, dont le magnétisme diminue rapidement du dehors au dedans, et que la condition conservatrice de l'aimantation ne dépend pas de la force coercitive telle qu'on l'entend, mais du mode même de la distribution du magnétisme dans les aimants. Dans cette manière de voir, la trempe agit en déterminant dans la masse un état tel, que les molécules extérieures refroidies plus rapidement que celles de l'intérieur, se rapprochent plus que ne peuvent le faire celles-ci. Il en résulte que l'acier trempé possède une croûte dont la densité et les autres propriétés diffèrent de celles des couches internes; le magnétisme, en particulier, s'y conserve mieux; et c'est pour cela que l'acier aimanté

reste plus fortement magnétique. C'est par la même raison que le fer doux, quand il a été battu sous le marteau ou passé à la filière, acquiert la propriété de conserver un peu de magnétisme. Les parties extérieures ayant été rendues plus compactes que celles de l'intérieur, il en résulte une distribution inégale du magnétisme qui se trouve en plus grande quantité à l'extérieur qu'à l'intérieur. C'est ce qui fait encore que les petits barreaux prennent proportionnellement plus de magnétisme que les gros, leur surface étant proportionnellement à leur volume plus considérable. Voici une nouvelle expérience de Nobili, tout à fait à l'appui de son opinion. Ce physicien fit construire avec le même acier deux cylindres de même longueur et de même diamètre; l'un, massif, qui pesait 28 grammes, l'autre, creux, qui en pesait 16. Ces deux cylindres furent trempés de la même manière et aimantés l'un et l'autre à saturation. Placés à la même distance d'une aiguille de boussole ; le massif donna une déviation de 9° $\frac{1}{2}$, et le creux de 19°. La différence très-grande en faveur du cylindre creux, quoiqu'il ait une masse presque moitié moindre que le massif, tient à ce que le creux étant trempé en dehors et en dedans, il se trouve recouvert des deux côtés de cette croûte qui conserve le magnétisme, tandis que le massif ne la possède que sur sa surface extérieure.

Tous les faits relatifs à l'aimantation sont encore enveloppés, comme on le voit, d'une assez grande obscurité. Il ressort cependant d'eux tous un principe bien évident que nous avons déjà signalé, c'est la liaison qu'ils établissent entre le magnétisme et les propriétés moléculaires des corps. Nous verrons plus loin, en nous occupant de l'aimantation par les courants électriques, de nouvelles preuves en faveur de ce principe; peut-être même nous pourrons déterminer alors d'une manière plus précise, quelle est la nature du rapport dont il s'agit.

Nous ne dirons rien ici des expériences de quelques physiciens, et notamment de celles de M. Barlow, sur l'aimantation de corps de formes variées, tels que des anneaux et des sphères, et de l'action qu'ils exercent sur l'aiguille aimantée quand ils sont en

fer doux et non aimantés d'avance ou soumis seulement à l'action magnétisante du globe terrestre. Les lois auxquelles ces effets obéissent, remarquables par leur simplicité et leur régularité, ont servi à M. Poisson, dans ses recherches mathématiques sur le magnétisme. Nous nous bornerons à signaler un seul fait qui, par sa liaison avec ceux qui précèdent, nous paraît très-important; c'est que le pouvoir magnétique exercé par des sphères de fer doux, réside tout entier à leur surface et est complétement indépendant de leur masse, de telle façon que l'effet exercé par des boulets sur l'aiguille aimantée est exactement le même, qu'ils soient pleins ou creux. Cependant cette loi a des limites. M. Barlow a reconnu que l'enveloppe métallique doit avoir, au moins, une épaisseur de $\frac{1}{10}$ de millimètre environ pour agir comme si la sphère était massive [1].

[1] Les principaux travaux faits récemment sur le sujet traité dans ce chapitre, sont :

1° Scoresby (*Annales de chimie et de physique*. Paris, 1838, t. LXIX, p. 106);

2° Nobili (*Bibliothèque universelle de Genève*, t. LVI, p. 82 et suiv.);

3° Barlow (*Bibliothèque universelle*, t. XXXIV, p. 188).

CHAPITRE II.

ACTION MUTUELLE DU MAGNÉTISME ET DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE, ET DES COURANTS ÉLECTRIQUES LES UNS SUR LES AUTRES.

§ 1. Action mutuelle du magnétisme et des courants électriques.

Depuis longtemps les physiciens étaient frappés de l'analogie qui semblait exister entre les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques. Deux magnétismes comme deux électricités; des attractions et des répulsions exercées entre les magnétismes contraires comme entre les électricités suivant des lois semblables: voilà bien des points de ressemblance entre les deux classes de phénomènes. Cependant, c'est en vain qu'on avait cherché à établir entre elles par l'expérience une liaison plus intime. En 1805, MM. Hachette et Desormes avaient inutilement essayé de diriger, par l'effet du magnétisme terrestre, une pile voltaïque isolée, ayant par conséquent ses deux pôles également forts et librement suspendue; leurs tentatives avaient été infructueuses.

Ce n'est qu'en 1820 qu'un physicien danois, M. Oerstedt, parvint à découvrir le rapport, si longtemps cherché, entre le magnétisme et l'électricité; mais ce n'est point là où on avait constamment cru qu'il était, qu'il le trouva. L'électricité agit sur un aimant, et un aimant agit à son tour sur l'électricité, mais seulement lorsque l'électricité est en mouvement, c'est-à-dire à cet état que nous avons appelé *dynamique;* il n'y a aucune action quand l'électricité est à l'état *statique* ou de *tension.*

Voici l'expérience fondamentale d'Oerstedt:

On réunit par un fil de métal, dit *fil conjonctif,* les deux pôles d'une pile. On place ce fil au-dessus ou au-dessous d'une aiguille aimantée librement suspendue, et parallèlement à sa direction. Aussitôt on voit l'aiguille éprouver une déviation d'autant plus

considérable que la pile voltaïque est plus puissante, et tendre à se placer perpendiculairement au fil conjonctif; position qu'elle parvient à prendre quand l'électricité développée par la pile est très-forte. Le sens dans lequel a lieu la déviation dépend de deux circonstances. — La première circonstance est la position du fil conjonctif par rapport à l'aiguille aimantée; il peut être dessus ou dessous. La seconde est la communication de chacune des deux extrémités du fil conjonctif avec l'un ou avec l'autre pôle de la pile. Ainsi, si le fil conjonctif étant au-dessous de l'aiguille, le pôle positif de la pile communique avec l'extrémité du fil qui est du côté du sud, et le pôle négatif avec celle qui est du côté du nord, le pôle nord de l'aiguille aimantée dévie à l'est; il dévie à l'ouest si l'on change de place les pôles de la pile. Mais si le fil conjonctif est au-dessus de l'aiguille au lieu d'être au-dessous, les déviations ont lieu en sens contraire, c'est-à-dire que le pôle nord de l'aiguille dévie à l'ouest quand le pôle positif est à l'extrémité nord du fil conjonctif et le pôle négatif à l'extrémité sud, et à l'est quand on intervertit la place des pôles de la pile.

Si le fil conjonctif n'est pas placé parallèlement à l'aiguille, mais de manière que sa direction forme avec celle de l'aiguille, soit au-dessus, soit au-dessous d'elle, un angle plus ou moins grand, l'action est toujours la même; l'aiguille n'en manifeste pas moins la tendance à se placer en croix ou perpendiculairement au fil, tendance à laquelle elle obéit entièrement quand la force de la pile est suffisante pour surmonter la résistance à la déviation, qui provient de la force directrice de la terre. Il faut seulement observer que, dans ce cas comme dans le précédent, lorsque l'aiguille se met en croix par rapport au fil conjonctif, son pôle nord ne se porte pas indifféremment à l'est ou à l'ouest, mais que le sens suivant lequel a lieu la déviation est soumis aux lois qui régissent le cas primitif, celui où le fil conjonctif est placé dans l'origine parallèlement à la direction de l'aiguille.

M. Ampère ne tarda pas à s'emparer de l'expérience d'Oerstedt et à en tirer une foule de conséquences théoriques et expérimentales du plus haut intérêt qui formèrent, sous le nom d'*électro-dynamique*, une partie toute nouvelle de la

physique. Il observa d'abord que l'action découverte par Oerstedt n'avait pas lieu seulement dans le voisinage du fil conjonctif, mais qu'elle était exercée également par toutes les parties du conducteur qui unit les deux pôles d'une pile, et par la pile elle-même, mais seulement lorsque ses deux pôles communiquent entre eux, et non quand ils sont isolés. Il remarqua en outre que le sens dans lequel l'aiguille est déviée varie suivant qu'elle est placée sur la pile ou sur le fil conjonctif. C'est ce qu'il est facile de vérifier en plaçant une pile dans la direction du méridien magnétique avec une aiguille aimantée au-dessus d'elle aussi près que possible et un fil conjonctif parallèle à la pile avec une seconde aiguille également au-dessus du fil. Il faut que la pile et le fil soient assez éloignés l'un de l'autre pour que les deux aiguilles aimantées ne puissent pas s'influencer mutuellement; il est également nécessaire que la pile ne renferme point de fer dans sa construction; une pile en auges de cuivre à la Wollaston ou une pile à force constante de Daniell remplissent bien le but. Au moment où les extrémités du fil conjonctif sont mises en communication avec les conducteurs qui partent des pôles de la pile, on voit immédiatement les deux aiguilles aimantées se dévier; mais en sens contraire l'une de l'autre. Il en serait de même si l'on plaçait les aiguilles sur deux portions quelconques, mais parallèles des conducteurs qui unissent les pôles de la pile. Si on les place *au-dessous* au lieu de les placer *au-dessus*, on observe encore le même phénomène; seulement les deux déviations ont lieu chacune dans un sens contraire à celui dans lequel elles avaient lieu auparavant, et toujours par conséquent en sens inverse l'une de l'autre.

Ampère tira de cette expérience quelques conclusions importantes :

La première, c'est que la force quelconque qui agit sur l'aiguille aimantée émane également de toutes les parties d'un *circuit voltaïque*, en désignant par ces mots la pile et l'ensemble des conducteurs quels qu'ils soient qui réunissent ses pôles. La déviation a lieu dans le voisinage d'un conducteur liquide aussi bien que dans celui d'un conducteur solide; la seule con-

dition nécessaire, c'est que le courant soit transmis à travers le conducteur, c'est-à-dire que la neutralisation des deux électricités puisse s'y opérer d'une manière continue. Il résulte de là une différence très-grande entre le genre d'action qu'exerce l'électricité dynamique sur une aiguille aimantée et les phénomènes calorifiques lumineux ou chimiques qu'elle produit. Les premiers sont généraux, c'est-à-dire indépendants de la nature du conducteur; les seconds dépendent au contraire de la nature des conducteurs qui unissent les pôles, n'ont lieu que dans certaines parties déterminées du circuit, et peuvent même ne point avoir lieu du tout.

La seconde conclusion, c'est que la force dont il s'agit est circulante; car comment expliquer autrement pourquoi elle agit dans des sens contraires, quand elle émane de deux portions opposées ou parallèles du circuit, cette opposition étant la seule circonstance qui établisse une différence dans les conditions de l'expérience? On peut comparer son action à celle qu'exercerait un courant d'eau circulant dans un canal annulaire; dans ce cas, évidemment de petits corps légers flottants sur l'eau seraient entraînés dans des sens différents, par deux portions parallèles ou opposées du courant d'eau. Cette analogie a fait nommer *courant électrique* la force qui naît dans tout le circuit de la réunion des deux pôles d'une pile par un conducteur; le courant électrique est donc la représentation de l'état dynamique continu de l'électricité. Ampère a supposé, par une convention qui a été admise, que ce courant avait un *sens*, qu'il partait du pôle positif pour traverser le conducteur, aboutir au pôle négatif et revenir à travers la pile au pôle positif, son point de départ. Il est facile de voir, en indiquant sa direction au moyen de flèches, qu'en effet, en l'envisageant ainsi, il se trouve avoir un sens différent dans deux portions parallèles du même circuit, par exemple dans la pile même et dans la partie du conducteur qui lui est parallèle. C'est ce que fait voir la figure 81' dans laquelle deux aiguilles aimantées placées, l'une sur la pile, l'autre sur le conducteur parallèle à la pile, éprouvent des déviations dans un sens différent, le courant ayant lui-même au-dessous d'elles des directions opposées.

Du reste, rien ne prouve que ce sens soit le sens véritable du courant, ou même que le mouvement de l'électricité s'opère

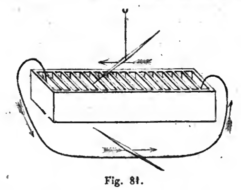


Fig. 81.

sous forme de courant; ce n'est, nous le répétons, qu'une convention, une manière commode de représenter un phénomène et qui permet de remonter facilement au fait lui-même, abstraction faite de toute idée théorique. En effet, dire que le courant va de A en B dans un conducteur, c'est dire en deux mots que l'extrémité A d'un conducteur est celle par où arrive l'électricité positive, et l'extrémité B celle par laquelle arrive la négative.

Cette convention une fois admise, on peut avec Ampère représenter, sous une forme très-commode pour la mémoire, l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée. Il n'y a qu'à concevoir un homme couché dans la portion du circuit qu'on considère, de telle façon que le courant entre par ses pieds et sorte par conséquent par sa tête; on n'a, de plus, qu'à concevoir que cet homme ait toujours la figure tournée vers l'aiguille de manière à la regarder : alors l'action se trouve être toujours telle que le pôle nord de l'aiguille se dévie à la gauche de cet homme. Il est facile de voir que cette espèce de formule comprend tous les cas possibles.

La force qui émane d'un courant électrique agit sur l'aiguille aimantée aussi bien dans le vide que dans l'air et à travers toutes les substances, sauf à travers celles qui sont magnétiques, telles que le fer. On peut également s'assurer

qu'elle diminue d'intensité à mesure que la distance augmente entre le courant et l'aiguille.

MM. Biot et Savart ont même déterminé très-vite, après la découverte d'Oerstedt, la loi que suit cette diminution. Dans ce but ils ont pris une aiguille aimantée très-courte; ils l'ont suspendue délicatement au moyen d'un fil de cocon et ils l'ont rendue indifférente au magnétisme terrestre en mettant près d'elle, à la distance convenable, un barreau aimanté. Cette aiguille n'a plus eu ainsi de force directrice, et s'est trouvée prête à obéir à toute action extérieure. MM. Biot et Savart ont alors fait agir sur elle un courant transmis à travers un fil de cuivre long de 2 à 3 mètres, tendu verticalement et disposé de façon que le plan horizontal passant par l'aiguille se partageât en deux parties égales. L'aiguille, dès que le courant agit sur elle, se place transversalement ou en croix par rapport au fil conducteur, suivant la loi que nous avons déjà énoncée; écartée de cette position, elle y revient par des oscillations isochrones d'une durée variable avec l'intensité de la force. Or, l'énergie du courant restant constante, cette intensité ne peut dépendre que de la distance qui le sépare de l'aiguille. Les expérimentateurs ont fait varier cette distance de 15 à 120 millimètres, en prenant les précautions nécessaires pour que, pendant la durée de l'expérience, le courant restât bien constant; et ils ont trouvé que *l'intensité de la force électro-magnétique est en raison inverse de la simple distance de l'aiguille aimantée au courant.* La loi n'est vraie qu'autant que le courant est rectiligne, et assez long pour qu'on puisse le regarder comme infini par rapport à l'aiguille; ou, ce qui revient au même, pour que les points qui seraient situés au delà ne puissent, à cause de leur éloignement, exercer d'action sensible sur l'aiguille. Il est facile de démontrer, par un simple calcul, que la loi que nous venons de trouver dans les limites des conditions indiquées est la conséquence d'une autre loi plus générale qu'on ne peut prouver directement, mais dont celle qui en dérive est la preuve, savoir : *que l'action élémentaire d'un simple point ou d'une simple section du courant sur l'aiguille est en raison inverse du carré de la distance.* On s'assure également que cette action est pro-

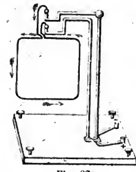
portionnelle au sinus de l'angle formé par la direction du courant, et par la ligne menée de la section du courant que l'on considère au milieu de l'aimant. En effet, en calculant, d'après ces deux principes, la somme de toutes les actions élémentaires qui sont exercées sur une petite aiguille par un courant rectiligne indéfini, on trouve que l'intensité de cette résultante doit, comme l'expérience l'indique, être inverse de la simple distance. Il en résulte encore que si le courant indéfini est angulaire, c'est-à-dire s'il se compose de deux directions formant un angle dont le sommet est sur le plan horizontal passant par l'aiguille, l'intensité de ce courant est aussi inverse de la simple distance, mais de plus proportionnelle à la tangente de la moitié de l'angle [1].

Après avoir analysé l'action d'un courant sur l'aiguille, comme nous l'avons vu, M. Ampère montra qu'un aimant fixe agit sur un courant mobile de la même manière qu'un courant fixe agit sur l'aiguille aimantée. Il imagina, pour obtenir un courant mobile, de courber un fil métallique de cuivre ou de laiton en forme de cercle ou de rectangle, en ramenant ses deux extrémités l'une près de l'autre, sans cependant qu'elles fussent en contact; il les termina par des pointes en acier ou en laiton placées sur la même verticale, et dont l'une, reposant sur le fond d'une capsule métallique remplie de mercure, supportait tout le conducteur mobile, tandis que l'autre, au-dessus ou au-dessous, ne faisait que plonger dans le mercure d'une capsule semblable sans en toucher le fond, pour ne pas nuire à la mobilité. Les deux capsules sont supportées chacune par un conducteur solide en forme de potence, l'un de ces conducteurs enveloppant l'autre ou étant très-rapproché de lui, sans cependant le toucher. On fait communiquer l'un des pôles de la pile avec l'extrémité inférieure de l'un des conducteurs fixes, et l'autre pôle avec l'extrémité correspondante de l'autre conducteur semblable [2]; on

[1] Voyez, pour les développements mathématiques, la note finale E.

[2] On peut établir cette communication soit par le simple contact, soit au moyen de pinces métalliques, soit, ce qui est plus commode, au moyen de deux rainures ou de deux cavités remplies de mercure dans lesquelles plongent les extrémités des conducteurs et les pôles de la pile.

établit ainsi le courant dans la partie mobile qui sert, au moyen des capsules pleines de mercure, à fermer le circuit (fig. 82). Il faut que les conducteurs fixes soient assez éloignés des conducteurs mobiles pour que, dans leurs différentes positions, les côtés de ces derniers ne soient pas influencés par les courants qui traversent les premiers. Au reste, ceux-ci étant très-rapprochés et traversés par des courants égaux et dirigés en sens contraire, leurs effets sur le conducteur mobile se neutralisent mutuellement.

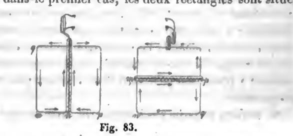

Fig. 82.

En plaçant un barreau aimanté au-dessous et très-près de la partie inférieure du courant mobile, et parallèlement à ce courant, on voit celui-ci se mouvoir et venir se placer tranversalement à l'aimant, mais toujours de façon à être dirigé dans la partie sur laquelle l'aimant agit, comme il doit l'être d'après la formule que nous avons établie plus haut, dans le cas du courant fixe et de l'aimant mobile. Il faut, en d'autres termes, que l'homme supposé couché dans le courant, les pieds tournés du côté par lequel celui-ci arrive, et regardant l'aimant qui est ici au-dessous de lui, ait toujours le pôle nord de cet aimant à sa gauche. Si, lorsque le conducteur mobile a pris cette position, on change le sens du courant en changeant de place les deux pôles de la pile, on voit aussitôt le conducteur se mettre en mouvement et décrire 180° pour venir prendre une position semblable à celle qu'il occupait, ayant alors le courant dirigé dans le sens convenable. Le même mouvement s'effectue si, au lieu de changer le sens du courant, on retourne l'aimant fixe de manière à placer son pôle nord là où était son pôle sud et réciproquement.

M. Ampère ne tarda pas à découvrir, en se servant d'un courant puissant et d'un conducteur mobile toujours rectangulaire ou circulaire, mais d'un diamètre de 40 à 50 centimètres au moins, que le magnétisme terrestre agit sur le courant comme agirait un aimant placé au-dessous de lui dans la direction de

l'aiguille de boussole, mais ayant son pôle sud tourné vers le nord et son pôle nord tourné vers le sud. Le courant mobile se place en effet sous l'influence du globe terrestre transversalement ou perpendiculalrement au méridien magnétique, et de façon à être dirigé de l'est à l'ouest dans sa partie inférieure, ce qui fait que l'homme couché dans le courant, les pieds à l'est et la tête à l'ouest, et la face tournée vers la terre, a à sa gauche le sud de la terre. Or, si c'était un aimant qui agissait, et non le globe, il devrait avoir le pôle nord de cet aimant à sa gauche, d'après la loi que nous avons établie; il en résulte donc que le globe terrestre agit comme un aimant dont le pôle nord serait au sud et dont le pôle sud serait au nord de la terre. Si l'on change le sens du courant dans le conducteur mobile, on voit ce conducteur se mouvoir majestueusement en décrivant un angle de 180°, pour venir se placer de façon que son plan soit toujours perpendiculaire à celui du méridien magnétique, mais qu'en même temps le courant soit de nouveau dirigé de l'est à l'ouest dans sa partie inférieure.

Cette action de la terre, quoique beaucoup moins énergique que celle d'un aimant puissant très-rapproché du conducteur, peut cependant compliquer les résultats quand on étudie cette dernière action. Aussi, pour s'en mettre à l'abri, M. Ampère imagina-t-il de contourner le fil conducteur mobile de manière à en former deux rectangles semblables parfaitement égaux l'un à côté de l'autre, ou bien l'un au-dessous de l'autre (figure 83); dans le premier cas, les deux rectangles sont situés


Fig. 83.

chacun d'un côté différent de l'axe de rotation, mais sur le même plan. De petites pièces de bois interposées entre les portions rapprochées du fil, et liées avec elles au moyen d'un fil de

soie, maintiennent la forme du conducteur, tout en empêchant le contact métallique entre ses différentes parties. Le fil est arrangé de façon que le courant traverse dans des sens différents les deux rectangles accolés ensemble ; il en résulte que l'action de la terre est neutralisée ou nulle sur le système mobile qu'on nomme, par cette raison, *astatique;* en effet, elle tend à donner à l'un des rectangles une direction exactement contraire à celle qu'elle tend à donner à l'autre, et comme les deux rectangles sont égaux, et que c'est le même courant qui les traverse l'un et l'autre, les deux effets se détruisent. De cette manière on se procure avec le premier système astatique un courant vertical, et avec le second un courant horizontal, l'un et l'autre mobiles et parfaitement indifférents à l'action du magnétisme terrestre. Nous nommerons, pour les distinguer, le premier conducteur astatique *vertical*, et le second conducteur astatique *horizontal.*

Le système de suspension employé par M. Ampère présente deux inconvénients : le premier, c'est l'impossibilité où se trouve le conducteur de tourner indifféremment dans tous les sens, étant retenu en un point de son mouvement circulaire par les branches des conducteurs fixes qui portent les capsules destinées à établir la communication avec les pôles de la pile ; le second, c'est sa résistance trop considérable au mouvement qu'éprouve le conducteur mobile par l'effet du frottement de la pointe qui repose sur le fond de la capsule. On a essayé de remédier à ces inconvénients de différente manières ; nous nous bornerons à en indiquer deux.

La première consiste à suspendre le conducteur mobile à un fil de soie sans torsion, de manière que les pointes qui le terminent puissent plonger dans le mercure sans toucher, ni l'une ni l'autre, le fond de la capsule ; on évite ainsi le frottement considérable qui résulte de ce contact, et on peut, en disposant les pointes, l'une dessus, l'autre dessous, obtenir un courant également mobile dans toutes les directions.

La seconde manière est celle qui a été imaginée immédiatement après les découvertes d'Ampère, par M. le professeur G. de la Rive. Elle consiste à rendre mobile tout le circuit, y compris la pile. Dans ce but, on fixe à un liége qu'on fait flotter sur de l'eau lé-

gèrement acidulée une pile composée seulement d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc, qu'on implante à travers le morceau de liége. Les extrémités supérieures de ces deux lames sont réunies par un fil métallique sur lequel on peut agir avec l'aimant : les extrémités inférieures et en général la plus grande partie des deux lames plongent dans l'eau acidulée. Comme la pile est faible, on fait faire plusieurs tours au fil, qu'on a eu soin d'envelopper de soie, afin d'éviter toute communication métallique, de manière à former un anneau circulaire ou rectangulaire (fig. 84). Le courant traverse successivement tous ces tours dans le même sens, d'où il résulte qu'au lieu d'agir avec l'aimant sur un seul courant, on agit en même temps sur plusieurs semblables, et que, par conséquent, on multiplie d'autant l'intensité de l'action. La possibilité de cette multiplication, dont nous verrons beaucoup d'autres applications, tient à cette propriété fondamentale de la force électro-magnétique que nous avons déjà reconnue, savoir, que toutes les parties d'un même circuit agissent également sur l'aimant. Ces flotteurs sont également dirigés par l'action du globe terrestre, de la même manière que les conducteurs mobiles traversés par le courant d'une forte pile ; il faut seulement que le diamètre de l'anneau ou du rectangle soit de 8 à 10 centimètres au moins.


Fig. 84.

On peut, si l'on tient à ce que le courant soit plus énergique, ce qui permet d'avoir au besoin pour conducteur un fil métallique ne faisant qu'un tour, fixer au liége une petite pile d'un couple de Daniell renfermée dans une enveloppe de verre mince, ou dont le cuivre forme le vase extérieur; on fait flotter le tout sur de l'eau ordinaire. On peut également ajuster au liége une pile en hélice formée d'une lame mince de platine et d'une lame mince et amalgamée de zinc. Dans ce cas, il faut que l'eau sur laquelle flotte le liége soit acidulée. C'est cette combinaison qui me paraît réunir les conditions les plus favorables de force et de légèreté. On adapte alors à l'appareil, pour établir la communication entre les pôles de la pile, les conduc-

teurs en fil de cuivre contournés comme on en a besoin pour les expériences; mais il faut donner de plus grandes dimensions aux figures, que forment les divers conducteurs, quand on ne met pas en pratique le système de la multiplication (fig. 85).



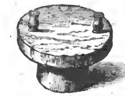


Fig. 85.

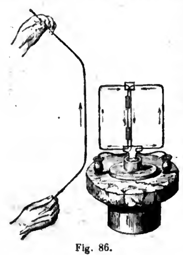
Du reste, avec les uns comme avec les autres, on peut facilement faire toutes les mêmes expériences qu'on fait avec l'appareil construit d'après le mode de suspension d'Ampère, et en particulier obtenir la direction par le globe terrestre d'un courant rectangulaire ou circulaire. Il faut seulement avoir bien soin, quand on n'emploie qu'un seul couple voltaïque, de ne pas oublier que, comme nous l'avons déjà fait remarquer dans la première partie de cet ouvrage, l'électricité positive se porte à la plaque de cuivre ou de platine, et la négative à celle de zinc; que, par conséquent, c'est, suivant notre convention, de la plaque de cuivre ou de platine que se trouve partir le courant pour traverser le conducteur, aller de là au zinc et retourner à travers le couple à son point de départ. Pour qu'on puisse mettre les différents conducteurs successivement dans le circuit du couple, la rondelle de liége porte deux petites capsules cylindriques en bois remplies de mercure, qui communiquent l'une avec le platine, l'autre avec le zinc du couple, et dans lesquelles on fait plonger les extrémités du conducteur à travers lequel le courant doit être transmis.

§ 2. Action mutuelle de deux courants électriques.

Dès l'origine de ses recherches, M. Ampère s'était aperçu qu'un courant électrique n'agit pas seulement sur un aimant, mais qu'il exerce aussi une action sur un autre courant élec-

trique. Il trouva que cette action consistait en ce que si deux portions de courants rectilignes et parallèles l'une à l'autre sont mobiles toutes les deux, ou sont l'une fixe, l'autre mobile, *elles s'attirent mutuellement lorsqu'elles sont dirigées dans le même sens, et se repoussent lorsqu'elles sont dirigées en sens contraire.* L'attraction ne cesse point ici avec le contact, comme lorsqu'il s'agit de l'attraction des corps électriques dans l'électricité statique ; elle persiste tant que les courants continuent à traverser les conducteurs.

Pour démontrer ce principe par l'expérience, on peut se servir de la pile flottante ou de l'appareil d'Ampère, en adaptant à l'une comme à l'autre le conducteur astatique vertical. On présente à l'une de ses branches verticales un fil métallique parallèle traversé par le courant d'une pile un peu forte ; on voit ce fil, qu'on peut tenir simplement à la main, attirer la branche du rectangle si les deux courants sont dirigés dans le même sens, c'est-à-dire tous les deux également de haut en bas ou de bas en haut, et la repousser s'ils sont dirigés en sens contraire, l'un de bas en haut et l'autre de haut en bas (fig. 86)[1].


Fig. 86.

M. Ampère ne tarda pas à généraliser la loi des courants parallèles en l'étendant au cas des courants angulaires, c'est-à-dire au cas où les deux conducteurs traversés chacun par un courant forment un angle, en étant situés soit dans le même plan, soit dans des plans différents ; dans ce dernier cas, l'angle

[1] On peut tenir à la main le fil qui réunit les deux pôles de la pile pour le présenter au courant mobile, sans que le courant cesse de le traverser, vu que le métal est un conducteur tellement supérieur au corps humain, que les deux électricités le traversent exclusivement pour se réunir l'une à l'autre.

formé par les deux courants est celui que font les deux plans dans lesquels ils sont situés, et il a pour sommet la ligne droite qui mesure leur plus courte distance. La loi que trouva Ampère dans ce cas général est la suivante : c'est que *les deux courants angulaires s'attirent lorsque leur direction est telle que tous les deux tendent vers le sommet de l'angle, ou que tous les deux en partent, et qu'ils se repoussent lorsque l'un va vers le sommet et que l'autre en part.* Cette loi comprend quatre cas différents, pour l'intelligence desquels il est nécessaire de jeter les yeux sur la fig. 87, dans laquelle les plus grosses flèches



Fig. 87.

représentent la direction des courants, et les plus petites le sens dans lequel les conducteurs cheminent l'un à l'égard de l'autre. Quand la suspension du courant mobile et la disposition du courant fixe sont telles que l'angle qu'ils forment entre eux reste invariable, cette action peut donner naissance à un mouvement continu de rotation. Mais, avant d'étudier cette forme particulière sous laquelle elle se présente quelquefois, nous devons la constater d'une manière plus directe, en nous occupant du cas dans lequel l'arrangement de l'expérience permet aux deux courants de s'approcher ou de s'éloigner, de manière que l'angle qu'ils forment entre eux augmente ou diminue.

On peut faire usage dans ce but de la pile flottante, en y ajustant le conducteur astatique horizontal. On présente à la branche supérieure un courant rectiligne également horizontal, de manière qu'il forme avec elle un angle dont le sommet est à l'une des extrémités de chacun des deux courants (fig. 88). Aussitôt, quel que soit cet angle, aigu, obtus ou droit, on voit, si les deux courants sont dirigés de façon à converger l'un et l'autre vers son sommet ou à en diverger, la branche mobile, entraînant avec elle tout le circuit dont elle fait partie, tourner

autour de ce sommet pour venir se placer parallèlement au conducteur fixe et aussi près de lui que possible. Dans cette position,

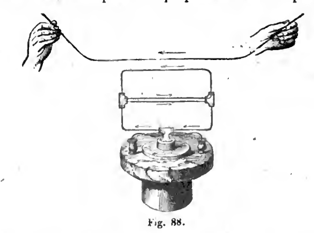


Fig. 88.

les deux courants se trouvent être devenus parallèles, et sont dirigés dans le même sens l'un à l'égard de l'autre. Si, au contraire, l'un des courants est primitivement dirigé vers le sommet de l'angle et que l'autre en parte, on voit la branche mobile, tournant toujours autour de ce sommet, fuir le conducteur fixe en augmentant l'angle qu'ils forment entre eux, et tendre à venir se placer dans le prolongement de ce conducteur en formant avec lui un angle de 180°, c'est-à-dire le plus grand angle possible.

Comme la distance entre les diverses parties des deux conducteurs, qui ne sont pas très-rapprochés du sommet de l'angle, est nécessairement très-grande, il faut, pour que l'expérience réussisse bien, que les courants soient très-énergiques. On peut, pour augmenter cette énergie, faire faire plusieurs tours au fil que forme le conducteur astatique, en ayant soin de le recouvrir de soie pour éviter le contact métallique. Mais il est préférable de se servir, pour ce genre d'expériences, de l'appareil qui permet l'emploi d'un courant produit par une forte pile. On y suspend le conducteur astatique horizontal, et on y adapte, pour agir sur la branche inférieure, un conducteur fixe horizontal, qu'on place au-dessous, mais aussi près

que possible de cette branche. On peut faire passer à travers le conducteur fixe le même courant que celui qui parcourt le conducteur mobile, si on préfère, ce qui est plus commode, ne pas employer deux piles différentes. Cette observation s'applique également à l'expérience dans laquelle on démontre, avec ce même appareil, l'action d'un conducteur vertical fixe sur la branche verticale du conducteur astatique mobile. Mais pour réaliser tous les cas possibles en n'employant qu'un seul courant qui parcourt successivement tout le système des conducteurs fixes et mobiles, il faut pouvoir changer le sens du courant, non-seulement dans les deux conducteurs à la fois, ce qui est toujours facile, puisqu'il suffit pour cela de changer de place les deux pôles de la pile, mais aussi dans l'un des conducteurs seulement sans le changer dans l'autre, ce qui exige un artifice particulier.

Voici, en conséquence, comment on peut disposer l'appareil de la figure 82, pour servir à toutes les expériences relatives à l'attraction et à la répulsion mutuelle des courants électriques. On place sur la table qui porte l'appareil (fig. 89) trois capsules en

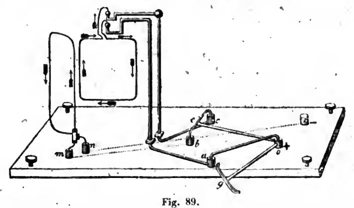


Fig. 89.

acier remplies de mercure et disposées en arc de cercle, dont les deux extrêmes *a* et *c* communiquent chacune avec l'un des supports métalliques en potence qui sont destinés à mettre le conducteur mobile dans le circuit. Celle du milieu *b* est mise en communication avec une pince métallique ou une capsule *m*

destinée à recevoir l'une des extrémités du conducteur fixe, soit vertical, soit horizontal, dont l'autre extrémité aboutit à une seconde pince ou à une seconde capsule *n*, de laquelle part un conducteur qui va à l'un des pôles de la pile. Le second pôle est fixé à un petit cylindre métallique *o*, placé au centre du cercle auquel appartient l'arc formé par les trois premières capsules. Le long de ce cylindre vertical glisse à frottement juste une douille d'où part un conducteur métallique horizontal qui, par son extrémité recourbée, peut plonger à volonté dans l'une des trois capsules *a*, *b* ou *c*. De la même douille partent deux tiges de verre, *d e* et *f g*, dont chacune porte à son extrémité un arc métallique dont les dimensions et la disposition sont calculées de façon que lorsque la tige horizontale plonge dans l'une des capsules extrêmes *a* ou *c*, les deux autres capsules sont réunies métalliquement par l'un ou par l'autre des deux arcs. Il est facile de voir que, par cet arrangement, le courant est établi dans tout le système des conducteurs fixe et mobile, et qu'il suffit, pour changer sa direction dans l'un des conducteurs (le mobile), sans le changer dans l'autre (le fixe), de faire plonger la tige horizontale alternativement dans l'une ou dans l'autre des deux capsules extrêmes. En effet, en supposant que le pôle positif de la pile communique avec le centre *o* de l'arc de cercle, le courant partant de là arrive, par la tige métallique, à l'une des capsules extrêmes *a* ou *c*, passe de là à l'un des supports en potence, traverse le conducteur mobile, revient par l'autre support à la seconde capsule extrême, puis passe, au moyen de l'arc métallique, à la capsule du milieu *b*, d'où il se dirige à l'une des extrémités *m* du conducteur fixe, qu'il parcourt pour aboutir à l'autre extrémité *n* de ce même conducteur et de là au pôle négatif de la pile. Quand on veut agir sur le conducteur mobile uniquement par un aimant ou par le globe terrestre, on se borne à enlever le système des conducteurs fixes, et à unir par un fil métallique les deux pinces ou capsules *m* et *n*, qui étaient destinées à le mettre dans le circuit. Il est facile de voir qu'alors le conducteur mobile est mis dans le circuit, et qu'on peut changer la direction du courant qui le parcourt par le même artifice qu'on employait quand le conducteur fixe était

également traversé par le courant. On peut ainsi se passer de l'appareil de la fig. 82, celui que nous venons de décrire pouvant servir au même usage. La fig. 89 représente le cas où le conducteur fixe est vertical, et il sert pour la démonstration de l'attraction et de la répulsion des courants parallèles; la fig. 90

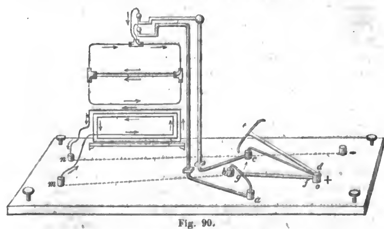


Fig. 90.

représente le cas où le conducteur fixe est horizontal; c'est celui qui sert à l'étude des courants angulaires. Ce conducteur fixe horizontal se compose ordinairement, non pas d'un seul fil, mais d'un fil recouvert de soie faisant plusieurs révolutions autour d'un cadre, et dont les deux extrémités sont mises en communication avec les pinces ou capsules *m* et *n;* cette multiplication rend beaucoup plus énergique l'action du courant fixe sur le courant mobile [1].

Pour constater la loi des courants angulaires, on fait usage, comme nous l'avons dit, du conducteur astatique horizontal, et c'est sur sa branche inférieure, qui ne peut avoir qu'un mouvement de rotation autour de l'axe de suspension, qu'agit le

[1] M. Ampère avait réuni dans un appareil toutes les combinaisons destinées à produire les différents phénomènes que nous venons de décrire, et même la plupart de ceux qui suivent. Nous avons trouvé un grand avantage à avoir des appareils distincts pour chaque expérience. On évite ainsi toute confusion, et le phénomène, déjà assez compliqué de lui-même, en devient bien plus clair et plus frappant.

courant fixe. On peut donner au conducteur mobile une forme telle (fig. 91) que le mouvement de rotation ait lieu autour de l'extrémité de la branche horizontale. L'expérience se fait alors de la même manière qu'avec le circuit flottant, et elle donne les mêmes résultats, qui sont seulement plus prononcés, à cause de la possibilité qu'on a d'employer des courants plus énergiques. Ordinairement cependant le mouvement de rotation a lieu au milieu de la branche horizontale du conducteur mobile astatique (fig. 90). Il est facile en effet de voir que, dans ce cas, l'effet est doublé; car les deux courants éprouvent, dans chacun des angles qu'ils forment en se croisant, des actions attractives et répulsives qui, étant soumises à la loi que nous avons énoncée, concourent pour imprimer à la branche mobile un mouvement dans deux sens qui s'accordent. Elles sont en effet répulsives dans deux des angles et attractives dans les deux autres, et il en résulte qu'elles obligent le courant mobile à venir se placer parallèlement au fixe, de façon que leur direction soit la même à l'un et à l'autre. Si l'on change alors le sens relatif des deux courants, on voit le courant mobile décrire un angle de 180° pour venir se placer de nouveau parallèlement au courant fixe, de façon à être dirigé dans le même sens que lui. Cette expérience montre que l'action des courants angulaires peut, suivant le mode de suspension et la position du point fixe autour duquel le mouvement s'opère, transformer l'attraction et la répulsion en un changement de direction; mais l'effet simple et primitif est bien l'attraction et la répulsion; le changement de direction n'en est qu'une conséquence facile à comprendre, et tenant au mode de suspension.

Fig. 91.

Nous avons dit que la loi des courants angulaires est la même, quelle que soit la grandeur de l'angle; c'est ce qu'il est facile de constater par l'expérience au moyen de l'appareil de la figure 90. Envisagée sous ce rapport, la loi des courants parallèles n'est qu'un cas particulier de la loi générale, celui où l'angle est zéro. Un autre cas particulier non moins intéressant est celui où l'angle est de 180°, c'est-à-dire

où l'un des courants n'est que le prolongement de l'autre. M. Ampère a réussi à vérifier directement la loi dans ce cas. Dans ce but, il a divisé par une cloison en verre un plat en terre de pipe en deux compartiments égaux, qu'il a remplis de mercure; puis, prenant un fil de métal récouvert de soie, dont il a mis à nu les deux extrémités, il l'a contourné en forme d'arc, en ayant soin que les deux bouts du fil perpendiculaire à la partie qui formait l'arc fussent parallèles l'une à l'autre. Il a fait flotter sur le mercure ce fil ainsi arrangé (fig. 92), de façon que les deux branches parallèles et horizontales fussent, l'une d'un côté, l'autre de l'autre côté de la cloison de verre, toutes les deux parallèles à cette cloison, et que les extrémités, mises à nu, fussent bien en contact avec le mercure. Puis, plongeant les pôles de la pile, l'un dans le compartiment à gauche, l'autre dans le compartiment à droite, il a ainsi obligé le courant à traverser le fil métallique flottant. Aussitôt que le circuit est fermé, on voit le flotteur glisser sur le mercure en s'éloignant rapidement en arrière; effet dû à ce que, pour chacune des branches séparément, il y a répulsion entre le courant qui la traverse et le courant qui est transmis dans le mercure avant de pénétrer dans le fil ou après en être sorti. Le courant du mercure et celui du fil ne sont en effet que le prolongement l'un de l'autre, ou, ce qui revient au même, ce sont deux courants formant un angle de 180°, dont l'un va au sommet de l'angle et dont l'autre en part; il doit donc y avoir répulsion entre eux, et cela pour chacune des deux branches séparément. Cette conséquence importante de la loi générale peut s'énoncer aussi en disant que *toutes les portions d'un même courant se repoussent les unes les autres.*



Fig. 92.

Voici une expérience de Davy, qui démontre sous une autre forme la même loi. Elle consiste à introduire par deux petits trous percés dans un plat ou dans une capsule, à une distance de quelques centimètres l'un de l'autre, deux bouts de fil de platine très-courts; on remplit la capsule de mercure de façon

seulement que l'extrémité de chacun des deux bouts de fil en soit recouverte d'une couche très-mince. Puis on fait communiquer par dessous ces fils avec les pôles de la pile; le courant est transmis ainsi à travers le mercure d'un fil à l'autre. On voit aussitôt le mercure se soulever au-dessus de chacun des fils, sous forme de petits cônes qui, retombant par l'effet de la pesanteur et se soulevant de nouveau par l'effet du courant, déterminent dans le mercure une série d'ondulations. La répulsion qui a lieu entre les portions du même courant s'exerce ici sur le mercure, le fil étant fixe, tandis que dans l'expérience d'Ampère, c'était le fil mobile qu'elle mettait en mouvement.

On peut, en rattachant au même principe l'expérience du moulinet électrique que nous avons décrite dans le cinquième chapitre de la seconde partie de cet ouvrage, en donner une explication bien meilleure que celle qui est généralement admise. En effet, dans le moulinet électrique, l'électricité qui sort par les pointes forme un courant qui se propage dans le milieu dans lequel elle pénètre, dans l'air en particulier. Or, le mouvement continu de rotation qu'éprouve le moulinet dans le sens opposé aux pointes n'est que le résultat de la répulsion continuelle qui a lieu entre le courant qui parcourt la branche métallique mobile et celui qui en sort pour pénétrer dans l'air.

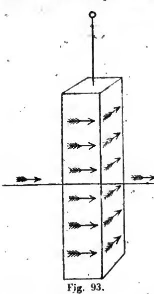
§ 3. Théorie d'Ampère sur la constitution des aimants.

Après avoir étudié l'action mutuelle des courants électriques les uns sur les autres, et en avoir déterminé les lois, Ampère essaya d'y rattacher l'action des courants et des aimants, au moyen d'une hypothèse très-ingénieuse sur la nature du magnétisme. En analysant avec soin l'action des différentes parties d'un aimant sur un courant mobile, et celle d'un courant sur les différentes parties d'un aimant mobile, il vit que ces actions étaient exactement les mêmes que celles qui auraient eu lieu si l'on avait remplacé la section de l'aimant agissante ou soumise à l'action, par un courant électrique tournant autour de cette section, et par conséquent fermé et situé dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'aimant. Il parvint de plus, en voyant dans

quel cas il y avait attraction et dans quel cas il y avait répulsion entre la section d'un aimant et d'un courant électrique dont il connaissait la direction, à déterminer quel devait être le sens de ces courants hypothétiques, et pour cela il se fonda uniquement sur la loi, qu'il y a attraction quand les courants vont dans le même sens et répulsion quand ils vont en sens contraire. Voici comment on parvient à obtenir cette détermination : on prend un barreau aimanté prismatique, en ayant soin de le tenir horizontalement, de manière à avoir le pôle nord à sa gauche; on le présente à la branche verticale du conducteur mobile astatique mis seul dans le circuit; on trouve que, si cette branche est traversée par le courant dirigé de bas en haut, elle est repoussée par toutes les parties de chacune des faces du barreau, et cela de l'une de ses extrémités à l'autre, qu'elle est au contraire attirée si son courant est dirigé de haut en bas. En promenant ainsi d'un bout à l'autre chacune des faces du barreau devant le courant vertical, il faut avoir soin de tenir toujours l'aimant horizontalement et le pôle nord à gauche. Maintenant, si, au moyen d'un peu de cire molle, on applique sur chacune des faces de l'aimant de petites flèches en carton avec la pointe tournée dans la direction suivant laquelle devrait cheminer un courant pour produire sur le conducteur mobile l'attraction ou la répulsion qu'y détermine l'action de l'aimant, on trouve que ces petites flèches représentent un courant circulant autour de chacune des sections de l'aimant, partout dans le même sens, c'est-à-dire de haut en bas dans la face qui est tournée vers le conducteur mobile, de bas en haut dans celle qui lui est opposée, en s'éloignant du conducteur dans sa face inférieure et en s'approchant dans sa face supérieure. L'ensemble de ces directions constitue bien un courant circulant autour de chaque section de l'aimant, comme dans un circuit fermé. Lorsque, sans changer les flèches de position, on retourne l'aimant, en mettant le pôle nord à droite, il est facile de comprendre qu'alors leur direction étant renversée par le seul fait de ce retournement, il en résulte que le courant qu'elles représentent va de bas en haut dans la face qui regarde le courant mobile. Aussi il y a entre les différentes parties de l'aimant qu'on pré-

sente successivement au courant, et le courant lui-même, répulsion quand le courant est dirigé de bas en haut; action précisément contraire à celle qui avait lieu dans le cas précédent, c'est-à-dire avant qu'on n'eût retourné l'aimant.

On obtient un résultat parfaitement semblable en présentant un courant horizontal aux différentes sections d'un aimant suspendu verticalement à un fil par une de ses extrémités (fig. 93), en indiquant par de petites flèches fixées sur les différentes faces de l'aimant, et à différentes hauteurs, la direction que doivent avoir les courants qui sont supposés circuler autour de sa surface pour rendre compte des effets attractifs ou répulsifs qu'on observe.


Fig. 93.

Un aimant peut donc être considéré comme formé par une réunion de courants électriques circulant tous dans le même sens autour de sa surface et situés dans des plans tous parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe de l'aimant. Quant au sens de ces courants, nous venons de voir, en analysant l'action mutuelle d'un aimant et d'un courant dont la direction est connue, qu'il est tel que, si on tient l'aimant horizontalement devant soi, le pôle nord à sa gauche, le courant va de haut en bas dans la face extérieure la plus éloignée de l'observateur, et de bas en haut par conséquent dans la face la plus rapprochée ou intérieure. Il est plus commode, pour bien fixer cette direction dans sa mémoire, de supposer l'aimant dans sa position naturelle, c'est-à-dire dans celle que lui imprime, lorsqu'il est mobile, la force directrice de la terre, son pôle nord, par conséquent, tourné vers le nord; on trouve alors que la direction des flèches qu'on a toujours laissées en place est telle, qu'elles indiquent

que le courant est dirigé de l'est à l'ouest dans la face inférieure de l'aimant, par conséquent de l'ouest à l'est dans sa face supérieure, qu'il est ascendant dans sa face située à l'ouest, et descendant dans celle qui est à l'est.

Ajoutons encore qu'il est évident que la forme du circuit dans lequel circule chacun de ces courants parallèles, dont la réunion constitue l'aimant, dépend de la forme extérieure de l'aimant lui-même; qu'elle est circulaire quand l'aimant est cylindrique; rectangulaire, quand sa figure est celle d'un parallélipipède, et que c'est une série de rectangles diminuant de grandeur, du milieu vers chacune des extrémités, quand la figure de l'aimant est un losange.

Il est facile de voir que l'hypothèse d'Ampère sur la constitution des aimants, telle que nous venons de l'exposer, rend compte de la manière la plus satisfaisante de l'expérience fondamentale d'Oerstedt, ainsi que de toutes celles relatives à la déviation d'un aimant ou d'un courant produite par l'action mutuelle qu'ils exercent l'un sur l'autre. Tous ces effets reviennent à ceux qui résultent de l'action mutuelle de deux courants l'un sur l'autre, action en vertu de laquelle ils tendent à se placer parallèlement entre eux, de façon à être dirigés dans le même sens. Pour que ce parallélisme puisse avoir lieu avec les courants qui circulent autour de l'aimant, il faut évidemment que celui-ci se trouve placé transversalement au courant qui agit sur lui ou sur lequel il agit. Or c'est précisément à quoi tend toujours l'action déviatrice qui se manifeste dans les expériences dans lesquelles le courant ou l'aimant mobile, au lieu de pouvoir obéir à l'attraction ou à la répulsion, ne peuvent que tourner autour d'un point central.

Pour confirmer l'hypothèse sur la nature du magnétisme à laquelle il avait été conduit, Ampère essaya de disposer des courants électriques de la même manière qu'il avait imaginé qu'ils étaient disposés naturellement dans les aimants; et il réussit à obtenir ainsi des assemblages de courants qui ont toutes les propriétés de véritables aimants. Il prit dans ce but un fil de cuivre, et le tournant en hélice en ayant soin que les spires successives ne se touchassent pas les unes les autres, il en ramena

les deux bouts intérieurement le long de l'axe de l'hélice jusqu'à son milieu, et là, faisant ressortir les extrémités sans qu'elles fussent en contact ni entre elles ni avec aucune partie de l'hélice, il les recourba pour pouvoir suspendre le tout comme conducteur mobile (fig. 94) à l'appareil de la fig. 82 ou 89. Puis, faisant passer le courant à travers le fil du conducteur

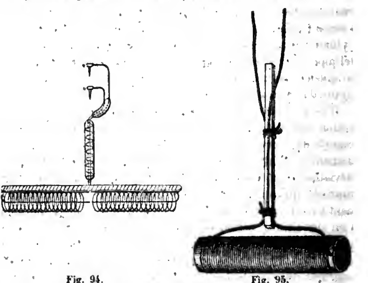


Fig. 94. Fig. 95.

mobile, il se trouva avoir un véritable aimant, dont l'axe et les deux pôles étaient l'axe et les extrémités de l'hélice. Un barreau aimanté ordinaire exerçait sur ces extrémités les mêmes actions attractives et répulsives qu'il aurait exercées sur celles d'une aiguille de boussole. Il vaut mieux, pour obtenir des effets plus marqués, se servir pour construire l'hélice d'un fil métallique recouvert de soie; on peut alors rapprocher les spires de l'hélice jusqu'au contact, sans craindre que le courant passe directement de l'une à l'autre au lieu d'en faire le tour, puisqu'il n'y a aucune communication métallique. On enroule le fil pour donner plus de consistance à l'hélice autour d'un tube de verre ou de carton auquel on fixe une tige en bois qui sert à tenir l'hélice à la main pour la présenter, comme on le ferait avec un aimant, soit à une aiguille de boussole, soit à une autre

hélice mobile (fig. 95). Dans ce dernier cas on obtient, avec deux hélices traversées chacune par des courants, que nous appellerons *hélices électrodynamiques*, tous les mêmes effets que produirait l'action mutuelle de deux aimants. On peut encore se procurer facilement un courant mobile en hélice pour imiter une aiguille aimantée, soit en ajustant le conducteur en forme d'hélice (fig. 96) à la petite pile flottante (fig. 85), soit en terminant les deux extrémités d'une hélice formée d'un fil de métal recouvert de soie par une plaque de zinc et par une plaque de cuivre, implantées l'une et l'autre dans un liége qui flotte sur de l'eau acidulée.



Fig. 96.

On doit à M. G. de la Rive une expérience qui met en évidence d'une manière remarquable l'hypothèse d'Ampère sur la constitution des aimants. Elle consiste à présenter à l'anneau électrique flottant que nous avons décrit (fig. 84 ou 85) un barreau aimanté qu'on tient par l'une de ses extrémités, tandis que l'autre est placée au centre de l'anneau. On voit, lorsque les courants hypothétiques de l'aimant et les courants réels de l'anneau sont dirigés dans le même sens, l'anneau s'avancer parallèlement à lui-même jusqu'à ce qu'il soit parvenu au milieu de l'aimant, et une fois là y rester. Mais si l'on retire l'aimant et qu'on le retourne, c'est-à-dire qu'on le remette exactement dans la même position, en ayant eu soin seulement de changer ses pôles de place, on voit alors l'anneau reculer parallèlement à lui-même, effet dû à ce que ses courants et ceux de l'aimant sont dirigés en sens contraire. Ce qu'il y a de curieux c'est que, parvenu au delà de l'extrémité du barreau, l'anneau, au lieu de continuer à en être repoussé, tourne sur lui-même en décrivant un angle de 180°, se présente à l'aimant avec ses courants dirigés alors dans le même sens que les siens, et revient d'un mouvement rapide jusqu'au milieu du barreau, où de nouveau il reste en équilibre. On obtient également tous ces mêmes effets en substituant une hélice électrique au barreau aimanté. Ils peuvent facilement s'expliquer par l'attraction et la répulsion qu'exercent, suivant qu'ils ont un sens

relatif semblable ou différent, les courants de l'aimant ou de l'hélice sur les courants de l'anneau mobile. Quant au retourment qu'exécute l'anneau quand il sort de l'aimant après en avoir été repoussé, il est dû à ce que son plan n'étant jamais parfaitement perpendiculaire à l'axe du barreau, les actions répulsives sur les différents côtés ne sont pas égales, et se transforment en un changement de direction, qui est suivi nécessairement d'une attraction une fois que les courants de l'aimant et ceux de l'anneau sont dirigés dans le même sens. Il est aussi facile de comprendre pourquoi l'anneau s'arrête au milieu de l'aimant : c'est qu'évidemment dans la théorie d'Ampère, le milieu de l'aimant est, comme le milieu de l'hélice, le point d'application de la résultante de tous les courants parallèles perpendiculaires à l'axe et dirigés dans le même sens d'une extrémité à une autre; c'est donc le point où l'action exercée sur un courant extérieur doit être à son maximum.

On peut se demander ici pourquoi il n'en est pas de même lorsqu'un aimant, au lieu d'agir sur un ou plusieurs courants formant un anneau, agit sur du fer ou sur un autre aimant; on sait en effet qu'alors l'action est au contraire à son minimum au milieu de l'aimant et à son maximum aux pôles, c'est-à-dire à des points situés tout près de ses extrémités. Il y a plus : si on promène un courant électrique vertical le long et très-près de l'une des petites faces verticales d'une aiguille de boussole, on trouve que, lorsque ce courant est exactement vis-à-vis de l'un ou de l'autre pôle, il n'exerce aucune action, et que, si son action est d'une certaine nature, répulsive par exemple sur tous les points de la face de l'aimant compris entre les deux pôles, elle est d'une nature contraire (attractive dans ce cas) sur les points de cette *même face* situés au delà des pôles, qui, comme on le sait, ne sont jamais aux extrémités mêmes. Le même effet se présente en sens contraire sur la face opposée. Ainsi si le courant vertical est dirigé de bas en haut, il attire tous ceux des points de la face ouest de l'aiguille qui sont situés entre les deux pôles, et repousse ceux qui sont situés au delà; il attire au contraire tous les points de la face est situés entre les pôles, et repousse tous ceux qui sont situés au delà. Une ma-

nière commode et élégante de mettre en évidence ce genre d'action consiste à présenter à l'anneau flottant de M. G. de la Rive, et parallèlement à son plan, une des faces latérales d'un barreau aimanté, en ayant soin que le centre de l'anneau soit plus près de l'une des extrémités que du milieu du barreau. On voit alors l'anneau glisser le long de la face de l'aimant en appuyant contre elle ses deux côtés verticaux, et dès que l'un d'eux a dépassé le bout du barreau, l'anneau lui-même tourne en décrivant un angle de 90°, et remonte comme précédemment jusqu'au milieu de l'aimant. Ainsi, quoique dans l'un des côtés verticaux de l'anneau les courants soient dirigés dans un sens contraire à celui qu'ils ont dans l'autre, ils sont attirés l'un et l'autre par des points de la même face de l'aimant, situés, il est vrai, de deux côtés différents du pôle.

Les effets que nous venons de décrire, découverts et étudiés par Faraday et par M. de la Rive, parurent d'abord très-contraires à la théorie d'Ampère sur la nature des aimants; car, suivant cette théorie, les courants électriques dont l'assemblage compose un aimant auraient dû avoir tous la même direction sur la même face d'un barreau aimanté, et par conséquent n'auraient pu exercer des actions contraires selon qu'ils auraient été situés entre les deux pôles ou au delà des pôles. Enfin comment expliquer la nullité d'action aux pôles eux-mêmes?

Les objections que nous venons de signaler n'arrêtèrent point Ampère; il parvint à les surmonter toutes, et à établir sa théorie sur des bases assez solides pour qu'elle soit actuellement généralement admise. Il partit du principe que les courants électriques auxquels, suivant lui, les aimants doivent leurs propriétés sont moléculaires, c'est-à-dire qu'ils circulent autour de chaque particule. Ces courants électriques préexistent dans tous les corps magnétiques, même avant qu'ils soient aimantés; seulement ils sont disposés d'une manière irrégulière, et telle qu'ils se neutralisent les uns les autres. L'aimantation est l'opération par laquelle on leur imprime une direction commune, d'où résulte que la succession des portions extérieures des courants moléculaires, qui sont tous dirigés dans le même sens, constitue

un courant fini autour de l'aimant, tandis que les portions intérieures sont neutralisées par les extérieures, dirigées en sens contraire de la couche moléculaire suivante. Il faut, pour bien suivre ces effets, décomposer l'aimant en couches concentriques et semblables. La fig. 97 représente la section d'un aimant cylindrique dans cette hypothèse. On voit, en effet, que tous les courants moléculaires intérieurs se neutralisent; il ne reste que les extérieurs. La direction imprimée aux courants par l'aimantation se maintient dans les corps qui sont doués de la force coërcitive et cesse dans les autres, tels que le fer doux, dès que

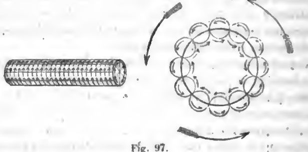


Fig. 97.

la force qui l'a déterminée vient à cesser, parce qu'alors tous les courants moléculaires, libres d'obéir à leur action mutuelle, prennent la position relative qui produit l'équilibre ou la neutralisation de tout effet extérieur.

Nous verrons à la fin de ce chapitre, dans un paragraphe spécial, comment, grâce aux travaux d'Ampère, complétés par ceux de Savary et de Weber, cette hypothèse sur la constitution des aimants peut rendre compte de tous les effets de l'action mutuelle des aimants et des courants, et des aimants les uns sur les autres, ainsi que des anomalies apparentes que nous venons de signaler.

§ 4. Phénomènes de rotation continue résultant de l'action mutuelle des aimants et des courants, et des courants les uns sur les autres.

En observant attentivement l'action contraire qu'exercent sur un courant vertical mobile, soit les parties correspondantes d'un

aimant prises sur ses deux faces opposées, soit les points qui, situés sur la même face, sont d'un côté différent de l'un ou l'autre pôle, M. Faraday en avait conclu que, si le courant pouvait tourner librement autour du pôle, il exécuterait un mouvement de rotation continue (fig. 98), mouvement qu'il est parvenu à réaliser.

Fig. 98.

Pour l'obtenir d'une manière prononcée, il faut placer un aimant cylindrique au centre d'une capsule remplie de mercure, en ayant soin que la surface de ce liquide soit un peu au-dessous du pôle de l'aimant; puis on fait partir d'un axe mobile, fixé verticalement au moyen de deux pointes entre le sommet de l'aimant et une pièce d'acier tenant à un support métallique, un fil mince de laiton recourbé en équerre, et dont la portion verticale se termine en une pointe fine plongeant légèrement dans le mercure, de manière à effleurer à peine sa surface (fig. 99). Un courant voltaïque est transmis à travers

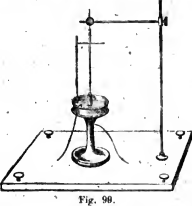


Fig. 99.

ce conducteur mobile au moyen du mercure d'une part et du support métallique de l'autre. Aussitôt on voit le fil se mettre en mouvement et tourner rapidement autour de l'aimant. Le sens de la rotation dépend à la fois de la direction du courant et de la nature du pôle de l'aimant autour duquel cette rotation a lieu. Si l'on change à la fois le pôle et la direction du courant, le sens de la rotation reste le même; pour qu'il change, il ne

faut faire varier en même temps que l'une ou l'autre des deux circonstances.

M. Faraday réussit également à déterminer un mouvement continu de rotation dans un aimant sous l'influence d'un courant, en faisant plonger verticalement dans un vase rempli de mercure, au moyen d'un lest en platine, un petit barreau aimanté dont le sommet seul apparaissait au-dessus du liquide (fig. 100). Une tige métallique communiquant avec l'un des pôles de la pile aboutissait verticalement au centre de la surface du mercure, qui elle-même était mise, par un point de sa circonférence, en communication avec l'autre pôle. Aussitôt que le courant était établi, l'aimant se mettait à tourner autour d'une ligne droite formée par le prolongement de la tige verticale au-dessous de la surface du mercure. Il faut observer qu'ici ce n'est pas un cylindre, mais un cône que décrit l'aimant, vu que son extrémité inférieure se place sur l'axe de rotation et y reste, pendant que son extrémité supérieure décrit un cercle autour du point où le conducteur vertical touche la surface du mercure. Le sens du mouvement dépend ici, comme dans le cas précédent, et de la direction du courant, et de celui des deux pôles magnétiques qui se trouve au haut de l'aimant.

Fig. 100.

Dans cette expérience, comme dans la précédente, la rotation va en s'accélérant jusqu'à un certain point auquel sa vitesse devient uniforme, ce qui est dû à la résistance qu'oppose le mercure à l'effet de la force accélératrice qui produit le mouvement.

Les expériences de Faraday semblèrent, au moment où elles furent faites, inconciliables avec les idées d'Ampère; mais ce savant n'avait pas encore fait connaître à cette époque sa loi des courants angulaires, au moyen de laquelle il parvint bientôt à expliquer facilement les phénomènes observés par Faraday, en les complétant par d'autres non moins curieux. Puis, pour ajouter une preuve expérimentale à la démonstration théorique qu'il avait donnée que tous ces faits n'étaient point contraires à son hypothèse sur la nature des aimants, il les reproduisit tous, en remplaçant les aimants par des hélices ou

cylindres électro-dynamiques, soit assemblages de courants électriques circulaires parallèles.

Pour bien comprendre comment une attraction ou une répulsion entre des courants peut donner lieu à une action rotatoire, il faut partir de la distinction qu'Ampère a établie entre les courants *fermés* et les courants *ouverts*. Un courant fermé est celui qui partant d'un point revient à ce même point après avoir décrit une figure d'une forme quelconque (peu importe cette forme). Il n'est pas nécessaire, pour qu'un courant soit fermé, que le circuit tout entier, y compris la pile, en fasse partie, comme cela a lieu dans les flotteurs. Il est également fermé dans les conducteurs mobiles dont l'une des extrémités part d'un point, tandis que l'autre revient à un point très-voisin, situé par rapport au premier de telle façon que le mouvement puisse avoir lieu autour d'une ligne passant par ces deux points et qui serve d'axe de rotation (fig. 101). Il est encore fermé dans une hélice dont l'un des bouts communique avec l'un des pôles de la pile et l'autre bout avec l'autre pôle. Enfin les courants qui composent un aimant, dans la théorie de M. Ampère, sont tous nécessairement des courants fermés.

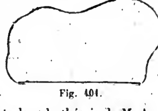


Fig. 101.

Un courant *ouvert* est un courant qui traverse un conducteur mobile dont l'une des extrémités ne revient pas, ni au point où se trouve l'autre, ni à un point situé sur le même axe. Ainsi, dans les expériences de Faraday que nous avons décrites, le courant mobile qui, partant de l'axe de rotation, se termine à un point de la surface du mercure plus ou moins distant de cet axe, est un courant ouvert, tandis qu'il serait fermé si le conducteur mobile partant de l'axe y revenait, quelles que fussent, du reste, la forme et la longueur de son contour. Le circuit d'un courant ouvert doit nécessairement renfermer un liquide; ce conducteur liquide est ordinairement du mercure, quelquefois de l'eau acidulée; il est vrai qu'on pourrait supposer que le conducteur mobile pût simplement glisser par sa pointe sur la surface d'une plaque métallique, d'où résulterait une communi-

cation suffisante pour que le courant fût transmis. Mais en pratique le frottement serait beaucoup trop considérable pour que le mouvement pût avoir lieu librement, et si l'on employait des courants assez puissants pour surmonter cette résistance, la pointe métallique risquerait dans son point de contact avec la plaque d'être fortement altérée par l'effet combiné du frottement et de la haute température que le passage de l'électricité détermine.

Pour que l'action d'un aimant ou d'un courant fermé puisse déterminer un mouvement de rotation continu sur un courant mobile, il faut que ce dernier soit ouvert; s'il est fermé, il ne peut éprouver qu'une attraction ou une répulsion, et par conséquent un changement de direction. Ce résultat, auquel le calcul a conduit Ampère, a été complétement confirmé par l'expérience; et il a été facile de démontrer que tous les faits qui lui semblent contraires proviennent de ce qu'il y a des courants ouverts dans les expériences qui établissent ces faits. S'il n'y en a pas, il n'y a pas de rotation continue. Ainsi deux aimants qui sont chacun un assemblage de courants fermés ne peuvent produire, par leur actiou mutuelle, de mouvement continu de rotation, et si dans la seconde expérience de Faraday nous voyons un aimant tourner sous l'action d'un courant qui semble fermé, il ne faut pas oublier qu'il y a dans le circuit du mercure, et qu'il en résulte un courant ouvert.

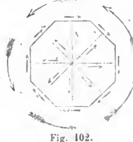
Voyons donc maintenant comment la théorie d'Ampère ou plutôt les lois qu'il a établies rendent parfaitement compte de la production d'un mouvement continu de rotation, par l'action mutuelle d'un courant fermé et d'un courant ouvert.

Examinons d'abord l'action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant également rectiligne, mais ne pouvant cheminer que parallèlement à lui-même. Il est évident, d'après la loi des courants angulaires, que, quel que soit l'angle que fasse le courant mobile avec le fixe, aussi bien quand il est dans le même plan que que lorsqu'il est dans un plan différent, l'action combinée des deux portions du courant fixe situées des deux côtés opposés du sommet de l'angle, l'une attractive, l'autre répulsive, le fait constamment marcher parallèlement à lui-

même. Le sens dans lequel il marche dépend de sa direction relativement à celle du courant fixe; il avance toujours dans l'angle dont les côtés sont formés par les courants qui sont dirigés tous les deux vers le sommet de l'angle ou qui tous les deux en divergent; tandis qu'il fuit l'angle dont l'un des côtés est formé par le courant qui converge vers le sommet, l'autre par celui qui en diverge. C'est une conséquence de l'attraction qui a lieu dans le premier cas, et de le répulsion qui a lieu dans le second. On peut vérifier ce résultat par une expérience directe, en suspendant un fil métallique horizontal tenu par deux tiges de verre placées verticalement à ses deux extrémités, de façon qu'il ne puisse se mouvoir que parallèlement à lui-même, en avant ou en arrière. On le met dans le circuit voltaïque au moyen de deux cellules longitudinales en verre remplies de mercure, dans lesquelles plongent ses extrémités légèrement recourbées. Il faut que les tiges verticales de verre soient très-longues, afin que le mouvement en avant ou en arrière puisse avoir une assez grande amplitude, sans que les pointes sortent du mercure. On approche de l'une des extrémités de ce fil, de manière qu'il fasse un angle quelconque avec lui, un conducteur rectiligne traversé par un fort courant, et on voit le mouvement du courant mobile s'opérer tel que nous l'avons indiqué; seulement il est très-limité, la disposition de l'appareil empêchant le fil métallique de s'avancer ou de se reculer indéfiniment, et l'éloignant en même temps du courant fixe par ce mouvement même. On emploie avec avantage pour conducteur fixe un des côtés du rectangle formé par un fil recouvert de soie replié plusieurs fois autour d'un cadre; le courant se trouve, par l'effet de cette multiplication, avoir une énergie beaucoup plus considérable. L'expérience que nous venons de décrire est la confirmation la plus directe de la loi des courants angulaires.

Du mouvement que nous venons de produire au mouvement continu de rotation il n'y a qu'un pas. En effet, fixons le conducteur mobile par celle de ses extrémités qui est la plus éloignée du conducteur fixe, de manière qu'il puisse décrire un cercle autour de cette extrémité; en même temps faisons plon-

ger son extrémité mobile dans un canal circulaire rempli de mercure et d'un rayon égal par conséquent à la longueur du fil; replions le conducteur fixe en forme de cercle autour et très-près de ce canal; enfin, faisons passer un courant à travers tous ces conducteurs : on voit alors le courant mobile décrire, d'un mouvement continu de rotation, un cercle autour de son point d'attache. En effet, dans quelque position qu'on prenne le courant mobile, si on examine l'action qu'exerce sur lui la partie la plus voisine du courant fixe qui, quoiqu'étant un arc de cercle, peut être considérée sans erreur sensible comme une ligne droite tangente à l'arc, on trouve qu'il est poussé constamment dans le même sens par les actions combinées attractive et répulsive des deux parties de cet arc, qui sont situées des deux côtés du sommet de l'angle qu'il forme avec lui. La figure 102, dans laquelle le courant fini est polygonal au lieu d'être circulaire et dans laquelle le courant mobile occupe successivement diverses positions, démontre d'une manière évidente comment l'action des courants angulaires donne naissance à un mouvement continu de rotation. Les petites flèches avec plumes indiquent le sens du mouvement et celles sans plumes le sens des courants.


Fig. 102.

Pour rendre le mouvement plus prononcé, on fait partir du centre de rotation, qui est une pointe verticale reposant sur le fond d'une capsule métallique remplie de mercure, afin de pouvoir établir la communication avec la pile, deux ou un plus grand nombre de fils métalliques semblables à celui dont nous venons d'analyser le mouvement, et dont l'extrémité libre est également recourbée verticalement, de manière à plonger légèrement dans le mercure du canal circulaire destiné à permettre la transmission du courant [1]. On a soin également de prendre pour conducteur fixe un fil de métal recouvert de soie et de lui faire faire plusieurs révolutions autour du canal circulaire, afin d'agir ainsi par la multiplication du courant fixe avec plus d'énergie sur les courants mobiles dirigés tous de même,

savoir, du centre à la circonférence ou de la circonférence au centre, et dont par conséquent le mouvement s'opère pour tous dans le même sens. La figure 103 représente un appareil dans lequel on a remplacé le mercure par de l'eau acidulée, placée dans un canal circulaire de cuivre ; les petites branches verticales du conducteur mobile sont toutes fixées à un cercle vertical de cuivre très-mince qui plonge dans le liquide ; un ruban de cuivre recouvert de soie, et qui fait plusieurs circonvolutions autour du canal circulaire, rend le courant fixe.

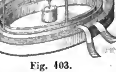


Fig. 103.

On peut, au courant horizontal mobile, en substituer un vertical disposé comme dans la première expérience de Faraday (fig. 104). Ce courant, il est vrai, n'est pas dans le même plan

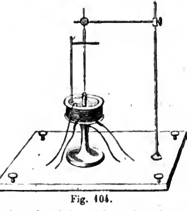


Fig. 104.

que le courant fixe circulaire qui est dans le plan horizontal, mais la loi des courants angulaires n'en subsiste pas moins entre eux, et le courant vertical éprouve par l'action de ce courant extérieur un mouvement continu de rotation. Au lieu d'un cercle ou d'un cylindre, le courant mobile peut décrire également un cône d'un angle quelconque autour de l'axe de rotation ; car l'action des courants l'un sur l'autre demeure la même, quel que soit le plan dans lequel ils se trouvent. Quant au sens de la rotation, il dépend de la direction relative des cou-

rants dans les deux conducteurs; il faut, pour le changer, changer cette direction dans l'un et non dans l'autre; c'est ce qu'il est facile de comprendre en ne perdant pas de vue la loi, et ce qu'il est facile d'opérer par une disposition convenable des conducteurs.

On peut également agir sur le courant vertical mobile par des courants circulaires fixes placés intérieurement, et non plus extérieurement au cylindre qu'il décrit; il suffit pour cela de substituer à l'aimant, dans la première expérience de Faraday (fig. 99), un fil tourné en hélice autour d'un cylindre de bois ou de cire, en ayant soin de prendre du fil métallique recouvert de soie, afin que les spires de l'hélice soient bien isolées les unes des autres. Aussitôt qu'un courant est transmis à travers ce fil, le courant mobile exécute un mouvement de rotation parfaitement semblable à celui qu'il exécutait autour de l'aimant. Pour en changer le sens, il faut changer la direction du courant dans un seulement des deux conducteurs. Cette dernière expérience, en prouvant qu'un cylindre électro-dynamique produit exactement le même effet qu'un aimant, est une nouvelle confirmation de la théorie d'Ampère sur la constitution des aimants.

La seconde expérience de Faraday, celle dans laquelle un aimant plongé verticalement dans le mercure éprouve une rotation autour d'un courant vertical, sembla d'abord contraire au principe d'Ampère, que l'action mutuelle de deux courants fermés ne peut donner naissance à un mouvement continu de rotation. Mais Ampère a fait voir que le phénomène n'était point dû à l'action du courant vertical sur l'aimant mobile, mais bien à celle des courants horizontaux qui se propagent sur la surface du mercure, du centre où aboutit l'extrémité inférieure du conducteur vertical, à la circonférence où se trouve un anneau métallique au moyen duquel le circuit voltaïque est complété[1]. Ces courants, qui vont tous dans le même sens les uns à l'égard des autres, se trouvent par conséquent avoir la même direction que ceux qui sont situés sur une même face de

[1] Pour faciliter le mouvement de rotation en diminuant le frottement, il est bon que la partie recourbée des branches métalliques qui plonge dans le mercure

l'aimant, et une direction contraire à ceux qui sont sur la face opposée (fig. 100). Il en résulte que leur double effet, attractif sur une face et répulsif sur l'autre, concourt à imprimer constamment à l'aimant un mouvement dans le sens de la face attirée. La constitution liquide du conducteur qui transmet les courants permet à l'aimant de les interrompre là même où il passe, d'où il résulte que le circuit est en fait un circuit ouvert et non un circuit fermé, et que ce cas rentre bien dans la règle générale posée par Ampère. Il est bon de recouvrir l'aimant d'une couche mince de cire ou de gomme laque, afin que les courants ne le traversent point.

Toutefois, il est possible d'obtenir un mouvement de rotation en obligeant un courant de traverser un aimant. Il faut pour cela que le courant qui a pénétré dans l'aimant, n'importe comment, en sorte dans une direction perpendiculaire à sa surface. Alors l'action de ce courant sur les deux portions du courant de l'aimant, séparées par le point d'où il sort, détermine un mouvement rapide de rotation du barreau aimanté sur son axe, ainsi que cela doit résulter de la loi des courants angulaires. Pour faire cette expérience, il faut (fig. 105) faire aboutir l'extrémité du conducteur fixe vertical sur le sommet de l'aimant qui, au moyen de son lest en platine, se tient verticalement dans le mercure; une petite coupe en acier vissée au haut et pleine de mercure sert à faciliter la transmission du courant, qui, après avoir pénétré du conducteur dans l'aimant, en sort pour entrer dans le mercure et rayonner vers la circonférence du vase. Le sens du mouvement de rotation dépend de celui du courant seulement, puisque les courants de l'aimant ne changent pas de direction. On peut (fig. 106), pour éviter l'emploi d'un vase rempli de mer-



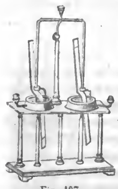
Fig. 105.



Fig. 106.

soit en platine, et de recouvrir le mercure d'une légère couche d'acide nitrique étendu.

cure, souder au milieu d'un barreau aimanté, et perpendiculairement à l'une de ses faces, un fil métallique qui, recourbé verticalement à son extrémité, plonge par la pointe qui la termine dans un canal annulaire rempli de mercure. Le barreau aimanté est appointi à ses deux extrémités et est fixé verticalement entre ses deux pointes de manière à pouvoir tourner librement. De son extrémité inférieure part un second fil conducteur semblable au premier, et plongeant comme lui par son extrémité recourbée dans le mercure d'un canal annulaire. Le courant est transmis à travers l'aimant au moyen de ces deux canaux et des deux fils qui y aboutissent. Cette disposition de l'expérience est très-préférable à la précédente, en ce qu'elle permet l'emploi d'un barreau aimanté beaucoup plus fort et par conséquent d'un courant plus faible. Quelquefois on courbe le barreau au milieu de sa longueur, de manière qu'il présente deux parties verticales de grandeur égale, unies par une petite portion horizontale sur laquelle est vissée une coupe pleine de mercure où aboutit un conducteur vertical destiné à transmettre le courant, dont le circuit s'achève, comme dans le cas précédent, au moyen d'un fil implanté perpendiculairement au milieu de l'aimant, et plongeant par son extrémité recourbée dans le canal circulaire plein de mercure (fig. 107). Il n'est pas alors nécessaire d'avoir un second fil dans la partie inférieure. La rotation de l'aimant a lieu de la même manière autour d'un axe qui passe par la pointe sur laquelle repose la face inférieure de la partie horizontale du barreau, de manière que celui-ci soit en équilibre. La figure fait facilement comprendre la manière dont l'appareil est disposé.


Fig. 107.

Le sens du mouvement varie dans ces diverses expériences avec la direction du courant, et selon que le pôle nord de l'aimant est en haut ou en bas. Il ne faut pas croire que dans la dernière la rotation soit due, comme quelques physiciens l'ont prétendu, à

l'action du courant vertical fixe sur le pôle de l'aimant, qui aurait la tendance de tourner autour de lui. En effet, si cela était, en prolongeant ce courant au-dessous du point d'appui, il devrait agir sur la seconde moitié de l'aimant et sur son pôle inférieur en sens contraire de l'action qu'il exerce au-dessus, puisque l'un des pôles tend à tourner autour du même courant dans une direction contraire à celle de la rotation de l'autre; il devrait donc en résulter qu'il n'y aurait dans ce cas aucun mouvement, les deux effets de rotation se neutralisant. Or, la rotation a lieu aussi bien dans ce cas que dans le précédent, preuve qu'elle n'est pas due à la cause que nous venons d'indiquer, mais bien à celle que nous lui avions précédemment assignée. Le phénomène de la rotation n'est pas dû non plus, comme on l'a dit par erreur, à l'action sur l'aimant des portions de courant qui le traversent ou qui traversent les fils conducteurs unis à l'aimant et se mouvant avec lui. En effet, comment un système solide pourrait-il être mis en mouvement par une force émanant d'une partie même du système et liée d'une manière indissoluble avec lui? L'action ne peut provenir que d'une partie du courant indépendante du système qui se meut; cette partie est la portion du circuit qui n'est pas liée à l'aimant mis en rotation, et qui se trouve par conséquent indépendante du système en mouvement. Ce genre d'action, passablement compliqué, a été cependant calculé comme les autres par M. Ampère d'une manière parfaitement rigoureuse.

Ce physicien, qui le premier a obtenu la rotation d'un aimant sur son axe, y avait été conduit par une expérience curieuse de Savary, destinée à montrer l'action des courants angulaires, et que nous décrirons encore. Un fil de métal roulé en spirale plate se termine en dedans perpendiculairement au plan de la spirale, et son extrémité recourbée plonge dans un godet plein de mercure. La spirale elle-même plonge dans un vase circulaire plein d'eau acidulée, dont la paroi communique avec l'un des pôles de la pile, tandis que l'autre est mis en communication avec le godet de mercure. L'appareil est disposé de façon que la tige verticale qui porte le godet traverse, tout en étant isolée par un tube de verre, le centre du vase de cuivre; il en

résulte que la tige qui porte la spirale, et par conséquent la spirale elle-même, peut tourner librement dans tous les sens autour de l'axe central (fig. 108). Aussitôt les courants qui sor-

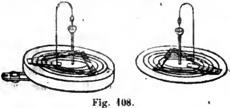


Fig. 108.

tent ou pénètrent par les différents points du fil en spirale, et traversent le liquide en rayonnant, exercent sur les courants qui circulent dans le fil lui-même une action déterminant un mouvement de rotation de la spirale autour de la tige verticale, conformément à la loi des courants angulaires. Selon que la spirale est tournée *sinistrorsum* ou *dextrorsum*, le mouvement a lieu dans un sens ou dans l'autre, vu qu'il résulte de cette différence un changement dans le sens relatif des courants de la spirale et de ceux du liquide.

On a beaucoup varié les appareils destinés à produire les phénomènes de rotation électro-dynamique. L'un des plus élégants est celui imaginé par M. Marsh (fig. 109), et qui consiste en un

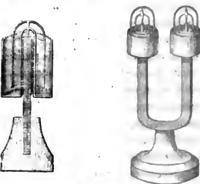


Fig. 109.

élément de pile, composé d'un vase annulaire de cuivre, formé de deux cylindres concentriques, dans lequel est placé le liquide conducteur, où plonge un cylindre de zinc. Une espèce de potence,

faite avec deux tiges verticales en métal, réunies par une autre en forme d'arc de cercle, munie d'une pointe dans son milieu, part du cylindre intérieur de cuivre et sert à suspendre le vase tout entier au-dessus d'un aimant vertical placé dans l'axe de l'appareil; une potence semblable part du cylindre de zinc et sert de même à le suspendre; la pointe de sa traverse horizontale repose au fond d'un petit godet rempli de mercure, qui se trouve lui-même sur la traverse de la potence du vase de cuivre et au-dessus de sa pointe. C'est par là que se fait la communication métallique nécessaire entre le zinc et le cuivre du couple. Lorsque l'appareil est ainsi disposé, on voit les deux potences, et par conséquent les cylindres auxquels elles sont liées, prendre, mais dans des sens contraires, un mouvement de rotation autour de l'aimant central. Il est facile de voir qu'en effet le courant chemine en sens opposé dans chacune d'elles [1].

Davy a observé que lorsqu'on approche le pôle d'un fort aimant, d'une masse de mercure traversée par des courants électriques, on détermine une rotation rapide de ce métal autour du conducteur solide qu'on y plonge pour transmettre le courant. L'expérience réussit bien avec l'appareil qui sert à démontrer le soulèvement de deux petits cônes de mercure au-dessus des pointes métalliques qui communiquent avec les pôles d'une pile. Le sens de la rotation dépend de celui du courant, ainsi que du pôle de l'aimant qu'on approche du mercure. Le phénomène est dû à l'action qu'exerce l'aimant sur les courants qui, partant de la pointe métallique plongée dans le mercure, se disséminent sur la surface de ce métal conducteur éminemment mobile. M. Poggendorff, qui a fait une étude spéciale de la rotation du mercure, a remarqué que, lorsqu'elle a lieu pendant un certain temps, elle se ralentit et cesse tout à fait. Cet effet paraît provenir de l'oxydation du mercure qui est facilitée par son mouvement, et qui, une fois qu'elle a eu lieu jusqu'à un certain point, diminue la liquidité du métal, en le rendant visqueux. Priestley avait déjà remarqué que la simple agitation

[1] En remplaçant les aimants par des électro-aimants dont nous parlerons dans le chapitre suivant, on augmente considérablement l'effet.

détermine au contact de l'air une oxydation de ce métal qui se manifeste par la couleur noirâtre qu'il prend et par la diminution de sa liquidité. On peut aussi obtenir la rotation du mercure en entourant une capsule remplie de ce métal d'un conducteur fixe circulaire faisant plusieurs révolutions autour de la capsule et traversée par un courant. On fait passer le même courant à travers le mercure, en le faisant pénétrer par le centre et en le faisant sortir par les bords du disque mobile que forme le liquide. Cette expérience rentre dans celle du conducteur rectiligne mobile qui est mis en rotation par l'action d'un courant extérieur; ici, chaque filet de mercure joue le rôle de ce conducteur mobile. Il faut seulement, pour que l'expérience réussisse bien, que le courant soit très-fort, vu qu'il doit se distribuer sur toute la surface du mercure.

Une observation intéressante est celle des mouvements rotatoires qu'affecte le mercure dans l'intérieur d'un aimant creux, et de leur comparaison avec ceux du mercure placé en dehors de cet aimant. On met dans l'intérieur d'un aimant creux vertical, et fermé à son extrémité inférieure, une certaine quantité de mercure plus ou moins grande; le courant arrive par une pointe métallique qui plonge au centre de la surface circulaire du mercure et rayonne du centre vers la surface intérieure de l'aimant creux. Si le niveau de la surface du mercure est inférieur au plan où se trouve le pôle supérieur de l'aimant, la rotation a lieu dans le sens déterminé par la direction des courants de l'aimant; elle atteint son maximum de vitesse quand ce niveau coïncide avec le milieu de l'aimant. Si le niveau coïncide exactement avec le plan du pôle, la rotation est nulle; s'il est supérieur à ce plan, elle a lieu en sens contraire. Ce résultat, analogue à celui que nous avons déjà mentionné, de l'action opposée des deux parties de la même face d'un aimant, situées d'un côté différent du pôle, tient, ainsi que nous l'avons déjà dit, à la distribution particulière qu'affectent aux extrémités des aimants les courants moléculaires. Lorsqu'on fait plonger l'aimant creux dans un vase rempli de mercure, en ayant soin que le niveau du liquide extérieur coïncide avec celui du liquide intérieur, on voit, conformément à ce qui doit ré-

sulter de la théorie d'Ampère, la surface du mercure prendra en dehors un mouvement de rotation contraire, quant à sa direction, à celui qu'elle a en dedans.

M. Poggendorff, qui a dernièrement étudié avec soin les phénomènes de rotation du mercure sous l'influence magnétique et électro-dynamique, a observé également, comme je l'avais fait déjà en 1824, que le sens de la rotation est différent, suivant la partie de l'aimant avec laquelle est en contact la surface du mercure qui transmet les courants. Il a remarqué, en particulier, que ce sens change suivant que la section de l'aimant plongé verticalement dans un vase plein de mercure est au-dessous du pôle. Si les courants qui, dans la théorie, constituent un aimant, étaient tous d'une extrémité à l'autre de l'aimant bien parallèles entre eux, et dirigés dans le même sens, il ne devrait pas en être ainsi. En effet, avec une hélice électro-dynamique, la rotation s'opère dans le même sens d'un bout à l'autre, mais aussi les pôles sont bien dans ces aimants électriques, à leur extrémité même, tandis que dans les véritables aimants les pôles sont, comme nous l'avons vu, à une petite distance des extrémités. C'est cette même circonstance qui fait que, comme nous l'avons vu, un même courant exerce sur la même face d'un aimant une action attractive ou répulsive, suivant qu'il agit sur la portion de l'aimant située entre les deux pôles, ou sur celles qui sont au delà de ces pôles, mais du même côté. Cette différence caractéristique entre un aimant et une hélice électro-dynamique tient très-probablement, comme nous le verrons à la fin de ce chapitre, à un arrangement particulier des courants moléculaires aux extrémités des aimants, provenant lui-même de l'action mutuelle un peu complexe qu'exercent ces courants les uns sur les autres, et de la constitution moléculaire de la substance magnétique.

Un tout autre genre de rotation est celui qu'on obtient en plaçant entre les deux pôles, rapprochés d'un aimant en fer à cheval, une roue métallique fixée verticalement à un axe horizontal qui passe par son centre et autour duquel elle peut tourner (fig. 110). Cette roue est tangente, dans le point le plus bas de sa circonférence, à une surface de mercure qui est mise en

communication avec l'un des pôles de la pile, tandis que l'autre communique au moyen de l'axe avec le centre de la roue. Le courant vertical est attiré par l'action combinée des deux branches de l'aimant, la roue, obéissant à cette attraction, se meut; comme la partie qui était traversée par le courant cesse de l'être dès qu'elle n'est plus verticale, puisqu'elle n'est plus alors tangente au mercure, l'action de l'aimant attire la nouvelle partie de la roue qui a remplacé la première, et ainsi de suite; d'où résulte le mouvement continu de rotation.

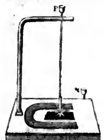


Fig. 110.

§ 5. Action du globe terrestre sur les courants électriques.

Nous avons déjà vu, dans le premier paragraphe de ce chapitre, qu'un fil de métal plié en cercle ou en rectangle, formant, en un mot, une courbe plane et fermée, se place, quand il est traversé par un courant et qu'il est mobile autour d'un axe vertical, dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique,

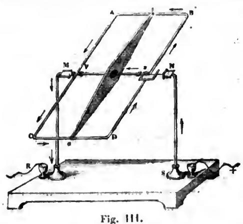


Fig. 111.

et de façon que le courant soit dirigé de l'est à l'ouest dans sa partie inférieure. Ampère a en outre découvert que, si le rec-

tangle est mobile autour d'un axe horizontal, de façon à être parfaitement en équilibre dans toutes ses positions autour de cet axe, qu'on a soin de disposer perpendiculairement au méridien magnétique, il se place, quand il est traversé par un courant, dans une position telle, que son plan est perpendiculaire à la direction de l'aiguille aimantée d'inclinaison; le courant est toujours dirigé de l'est à l'ouest, dans le côté inférieur du rectangle (fig. 111).

Dans toutes ces expériences, un courant circulaire, rectangulaire ou de forme quelconque, se conduit comme la section d'un aimant dont la forme et la grandeur seraient celles de la figure formée par le fil métallique. Un anneau formé de plusieurs tours circulaires ou rectangulaires du même fil recouvert de soie, tel qu'il se trouve dans les flotteurs de M. G. de La Rive, représente plusieurs sections continues d'un aimant, et peut obéir, plus facilement que d'autres combinaisons de courants, à l'action directrice de la terre, sous l'empire d'une très-petite force voltaïque, telle que celle qui résulte d'un seul couple. On a dans ces appareils de véritables boussoles; aussi les munit-on ordinairement de petites flèches en carton qui, au moyen d'une pièce en bois ou en baleine qui s'élève verticalement du liége, sont fixées par leur centre perpendiculairement au plan du courant. Ces flèches, quand les flotteurs ont pris la position

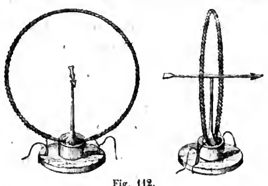


Fig. 112.

que leur imprime le globe terrestre, se trouvent avoir exactement la direction d'une aiguille de boussole. On a soin de placer

la pointe de la flèche de telle façon, qu'elle se trouve tournée du côté du nord quand le courant va de l'est à l'ouest dans la partie inférieure de l'anneau (fig. 112).

Enfin une hélice d'un diamètre un peu considérable (de 5 à 10 centimètres) se dirige, quand son fil est parcouru par un courant, comme le ferait un véritable aimant dont l'axe serait le même que celui de l'hélice. On peut se servir, pour cette expérience, des hélices que nous avons déjà décrites, et dont, sous le nom d'hélices électro-dynamiques, nous avons constaté les propriétés comme tout à fait semblables à celles des aimants. L'appareil le plus commode est un flotteur dans lequel l'anneau est remplacé par une hélice fermée, dont les deux bouts reviennent intérieurement jusqu'au milieu, le long de l'axe.

L'emploi des courants électriques, pour étudier l'action directrice de la terre, présente sur l'aiguille aimantée un avantage incontestable. Avec l'aimant, on n'a que des courants fermés; avec l'électricité dynamique, on peut avoir des courants ouverts aussi bien que des courants fermés. Or, l'action du globe terrestre sur un simple courant rectiligne non fermé peut fournir des résultats intéressants, et jeter de nouvelles lumières sur le magnétisme terrestre. C'est cette étude que j'ai faite en 1822, au moyen d'un appareil dont je donnerai brièvement la description.

Il se compose (fig. 113) de deux canaux circulaires en terre de pipe, formant chacun un anneau, l'un d'un diamètre un peu plus petit que l'autre; le plus grand, qu'on place inférieurement, a 30 à 40 centimètres de diamètre; l'autre en a 4 à 5 de moins. Ces deux canaux sont placés horizontalement, l'un au-dessus de l'autre, à une distance de 40 à 50 centimètres, et soutenus par des supports disposés de façon que leur centre se trouve sur la même verticale; chacun des deux canaux circulaires a une largeur de 3 à 4 centimètres, et est partagé en deux parties parfaitement égales par deux petites cloisons transversales placées sur le même diamètre. Ces cloisons, de moitié moins hautes que les parois du canal, peuvent, quand on le veut, être recouvertes du liquide qu'on met dans le canal, de

manière que les deux compartiments dans lesquels il est divisé n'en forment plus qu'un. Au centre de l'anneau, formé par le

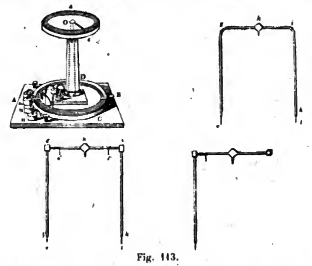


Fig. 113.

canal supérieur, est un godet en acier, qu'on peut élever ou abaisser à volonté, au moyen d'une vis, et auquel aboutit inférieurement un conducteur qui peut être mis en communication avec l'un des pôles de la pile. Le liquide contenu dans chacun des quatre compartiments peut également, au moyen d'une lame de platine, être mis dans le circuit voltaïque; ce liquide est du mercure, qu'on recouvre ordinairement d'une petite couche d'acide nitrique étendu, afin de faciliter le mouvement des pointes des conducteurs qui y plongent, par la destruction des impuretés dont la surface du métal est toujours plus ou moins recouverte.

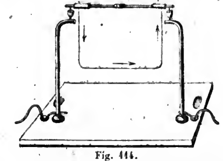
J'ai placé successivement sur cet appareil un rectangle privé de son côté inférieur, de son côté supérieur, et de tous les deux en même temps, et j'ai trouvé que lorsque les côtés restants étaient parcourus par le courant, le rectangle se dirigeait exactement comme lorsqu'il avait ses quatre côtés. Il se plaçait toujours perpendiculairement au méridien magnétique, de façon que le courant fût ascendant dans la branche verticale, située à l'ouest, et descendant dans celle située à l'est. L'inspection

de la figure, soit de l'appareil, soit des conducteurs, fait comprendre facilement comment on peut faire traverser par le courant les branches restantes des rectangles. Dans ceux où la branche supérieure manque, on la remplace par une baguette en verre, munie, au milieu de sa longueur, d'une pointe qui, reposant sur le fond du godet fixé au centre du plateau supérieur de l'appareil, porte le rectangle, en même temps qu'elle lui sert de pivot autour duquel il peut tourner. Les parties des conducteurs qui plongent dans le mercure sont des pointes de platine, et il faut avoir soin qu'elles effleurent seulement la surface du liquide, pour rendre le frottement le moindre possible. Quant aux communications à établir entre les différentes parties des conducteurs mobiles, pour les mettre dans le circuit voltaïque, elles s'opèrent toutes au moyen de capsules pleines de mercure, auxquelles aboutissent les conducteurs qui partent des canaux circulaires, remplis également de mercure.

Enfin j'ai réduit le rectangle à une seule branche verticale, fixée à l'extrémité d'une tige horizontale de verre, dont l'autre extrémité était chargée d'un contre-poids, pour faire équilibre au fil métallique. Les deux canaux circulaires étaient totalement remplis de mercure, de façon que les petites parois transversales en étaient recouvertes, et que la branche mobile pouvait faire librement tout le tour de l'appareil sans cesser d'être dans le circuit. Aussitôt qu'elle est traversée par le courant, *on la voit se placer de façon que le plan qu'elle forme avec l'axe autour duquel elle tourne soit perpendiculaire au méridien magnétique, et elle-même se porte à l'est si le courant qu'elle transmet est descendant, à l'ouest s'il est ascendant.* Telle est la loi simple de l'action directrice qu'exerce la terre sur un courant rectiligne vertical mobile, autour d'un axe qui lui est parallèle.

Mais ce n'est pas tout : il importe de savoir quelle est l'action qu'exerce la terre sur un courant rectiligne horizontal. Faraday avait observé qu'un semblable courant, quand il est libre de se mouvoir parallèlement à lui-même, s'avance ou se recule, suivant qu'il est dirigé dans un sens ou dans l'autre, et cela dans quelque azimut qu'on le mette. On peut faire cette expérience en suspendant par son centre, au moyen d'un long fil de soie

écrue, et par conséquent sans torsion, un fil de métal dont les extrémités recourbées plongent légèrement chacune dans une auge en verre remplie de mercure; les deux auges sont placées parallèlement l'une à l'autre. Aussitôt que le fil est dans le circuit voltaïque, on le voit, lorsqu'il est placé perpendiculairement au méridien magnétique, se porter vers le sud parallèlement à lui-même si le courant est dirigé de l'est à l'ouest, et vers le nord s'il est dirigé de l'ouest à l'est. Il s'avance ainsi, dans un sens ou dans l'autre, suivant sa direction, et cela dans tous les azimuts. S'il se trouve, par exemple, dans la direction du méridien magnétique, il se porte du côté de l'est, si le courant est dirigé du nord au sud, et vers l'ouest, s'il est dirigé du sud au nord. En général, il se porte vers l'observateur qui le regarde s'il est dirigé de la droite à la gauche de cet observateur, et s'éloigne de lui s'il est dirigé de sa gauche à sa droite. On peut, pour démontrer cette loi, se servir d'un appareil plus commode, que l'inspection de la figure suffit pour faire comprendre (fig. 114).


Fig. 114.

Il résulte de cette loi, qu'un courant horizontal fixé par son centre, et ne pouvant exécuter d'autre mouvement qu'un mouvement de rotation autour de ce centre, restera en équilibre sous l'action de la terre, puisqu'il ne peut obéir à l'effet de cette action, qui est de le faire avancer ou reculer parallèlement à lui-même. Il n'en est plus de même si, au lieu d'être fixé par son centre, le courant horizontal est fixé par une de ses extrémités, l'autre étant libre; alors, tendant à s'avancer toujours parallèlement à lui-même, et cela dans quelque azimut qu'il

se trouve, on le voit tourner d'un mouvement continu de rotation autour de son point fixe. Lorsque le courant est dirigé du centre de rotation à l'extrémité libre, le sens du mouvement est tel, qu'en supposant l'extrémité libre du courant à l'ouest, il se dirige d'abord vers le sud, continue sa route vers l'est, puis vers le nord, pour revenir vers l'ouest et recommencer de même. C'est l'inverse si le courant est dirigé de la circonférence au centre.

Ce mouvement continu de rotation opéré par l'action de la terre s'obtient facilement au moyen de l'appareil qui vient de nous servir (fig. 113). Un fil métallique porte à l'une de ses extrémités une pointe d'acier perpendiculaire à sa longueur, et au moyen de laquelle on le place sur le godet rempli de mercure qui est au centre de la partie supérieure de l'appareil; l'autre extrémité du fil se termine par une pointe en platine qui plonge légèrement dans le mercure dont est entièrement rempli le canal circulaire supérieur. Un petit contre-poids placé du côté de la pointe, opposé à celui où est le fil, tend à conserver à ce fil une position horizontale. L'un des pôles de la pile est mis en communication avec le godet central, et l'autre avec le mercure du canal supérieur. Le fil est ainsi placé dans le circuit, tout en conservant sa mobilité entière; il tourne comme une aiguille de montre. Le phénomène est encore plus marqué quand, du centre de suspension, on fait partir deux, trois ou quatre fils semblables, qui vont tous plonger par leur extrémité libre dans le mercure du canal circulaire. Il faut alors employer un fort courant qui se partage également entre les deux, trois ou quatre fils. Il est évident que le courant les parcourant tous dans la même direction, c'est-à-dire du centre à la circonférence ou de la circonférence au centre, ils tendent à tourner dans le même sens, en même temps, et que par conséquent leurs effets s'ajoutent. L'expérience réussit en général mieux avec deux branches qu'avec un plus grand nombre, parce que l'augmentation de frottement, lorsque le nombre des points qui plongent dans le mercure est trop considérable, fait plus perdre de force qu'on n'en gagne par la multiplication des branches. La longueur des branches verticales qui mettent les horizontales en communication avec le

courant est complétement indifférente, pourvu qu'il y en ait *deux* ou *quatre* situées symétriquement par rapport à l'axe.

L'analyse expérimentale que nous venons de faire nous montre clairement le rôle que jouent les diverses parties du courant rectangulaire dans les deux expériences fondamentales d'Ampère. Dans celle de la direction constante imprimée par la terre au rectangle vertical susceptible de tourner autour d'un axe central et vertical, les deux branches horizontales du rectangle n'éprouvent aucun effet; les verticales seules déterminent la direction. Dans l'expérience du rectangle susceptible de tourner seulement autour d'un axe horizontal, la direction perpendiculaire à celle de l'aiguille d'inclinaison que prend le plan du courant provient uniquement de l'action exercée sur les deux branches parallèles à l'axe, dont l'une, celle dans laquelle le courant est dirigé de l'est à l'ouest, se porte vers le sud, et l'autre, celle dans laquelle le courant est dirigé de l'ouest à l'est, se porte vers le nord. Les deux branches latérales perpendiculaires à l'axe de rotation, ne pouvant s'avancer dans aucun sens parallèlement à elles-mêmes, n'éprouvent aucune action, et ne contribuent donc point à la direction que prend le conducteur mobile [1].

Nous avons déjà parlé de l'hypothèse d'Ampère sur la cause du magnétisme terrestre. Il admet que le globe terrestre est entouré de courants électriques dirigés tous de l'est à l'ouest, et situés à une petite profondeur au-dessous de la surface du sol. Ces courants ont, comme ceux de l'aimant ou d'un solénoïde, une résultante qui se trouve au milieu, et par conséquent dans ce cas à l'équateur magnétique; on peut donc considérer leur action comme équivalente à celle qu'exercerait une ceinture de forts courants dirigés de l'est à l'ouest à l'équateur magnétique. Il n'est pas difficile de prouver que l'action de cette ceinture de courants sur des courants mobiles doit produire exactement les effets que l'expérience nous a fait découvrir. Il

[1] M. Pouillet était arrivé en même temps que moi à des résultats assez semblables aux miens quant à l'action de la terre sur des courants mobiles; seulement il en donnait une interprétation différente tenant à sa manière d'envisager les phénomènes électro-dynamiques.

suffit pour cela de montrer qu'elle rend compte des deux lois auxquelles on peut ramener tous ces phénomènes :

1° Un courant vertical mobile autour d'un axe vertical se place de façon que le plan qui l'unit à son axe soit perpendiculaire au méridien magnétique, et que lui-même soit à l'est de cet axe s'il est descendant, et à l'ouest s'il est ascendant;

2° Un courant horizontal, susceptible de se mouvoir parallèlement à lui-même, s'avance ou se recule suivant qu'il est dirigé dans un sens ou dans un autre, quel que soit l'azimut dans lequel il est placé.

Ces deux lois sont la conséquence de l'action du courant équatorial sur les courants mobiles.

Pour le démontrer, en ce qui concerne la première, supposons un courant horizontal indéfini représentant celui de l'équateur et dirigé de l'est à l'ouest (fig. 115), et un courant ver-

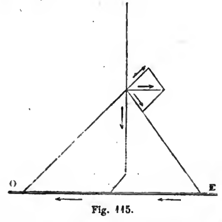


Fig. 115.

tical mobile autour de son axe situé dans un plan différent : menons la droite qui mesure la plus courte distance entre les deux courants. Elle est le sommet de l'angle dièdre qu'ils forment. Si le courant mobile est descendant, il est évident qu'il est dirigé vers le sommet de l'angle ainsi que la portion du courant fixe située à l'est de ce sommet ; il est donc attiré par cette portion et repoussé par l'autre; il tend donc à se porter à l'est. Si on décompose la force qui l'y porte, et qui est parallèle

à la direction du courant indéfini, en deux composantes, l'une dirigée dans le plan qui unit le courant à son axe et perpendiculaire à cet axe, l'autre perpendiculaire à ce plan, on voit que la première est détruite par la résistance de l'axe, et que la seconde seule fait mouvoir le courant, qui se place en conséquence de manière que son plan soit parallèle au courant indéfini et qu'il soit lui-même du côté de l'est. Il est en équilibre dans cette position, car alors la composante qui le faisait mouvoir devient nulle. Si le courant est ascendant, c'est à l'ouest et non à l'est qu'il est porté, et il reste également en équilibre quand le plan qui l'unit à son axe est parallèle au courant indéfini. Or, ce courant indéfini est situé à l'équateur magnétique; par conséquent, tout plan qui est parallèle à cet équateur est perpendiculaire au méridien magnétique. L'axe doit éprouver dans les deux cas d'équilibre une traction provenant de la tendance qu'a le courant de se porter toujours plus à l'est s'il est descendant, et à l'ouest s'il est ascendant; tendance en vertu de laquelle, s'il était libre et isolé, il tournerait constamment autour du globe terrestre, de l'ouest à l'est dans le premier cas, et de l'est à l'ouest dans le second; hypothèse impossible à réaliser, puisqu'il faut nécessairement que le fil métallique qui transmet le courant fasse partie d'un circuit voltaïque.

La seconde loi est une conséquence encore plus directe, pour ainsi dire, que la première, de l'action du courant équatorial. Quel que soit l'angle que le courant mobile horizontal forme avec le courant fixe, que cet angle soit aigu, droit ou obtus, qu'il soit même nul, comme cela a lieu quand les deux courants sont parallèles, il est évident que les deux portions du courant fixe que sépare le sommet de l'angle concourent à pousser le mobile du côté de celle de ces deux portions dont le courant est dirigé dans le même sens relatif. Le mode de suspension peut seul arrêter le mouvement. Si le courant horizontal est mobile autour d'un axe qui lui est parallèle, mais situé au-dessus de lui, on le voit se soulever et se placer dans le même plan horizontal que son axe, lorsque celui-ci est dans le méridien magnétique; il faut seulement ajouter à l'axe un contre-poids, destiné à neutraliser le plus possible l'effet de la pesanteur sur le fil

métallique qui transmet le courant. L'appareil qui nous a servi plus haut à démontrer qu'un circuit fermé peut se placer perpendiculairement à l'aiguille d'inclinaison (fig. 113) est le meilleur pour faire cette expérience, pourvu qu'on ait soin de le placer de façon que son axe ne soit plus perpendiculaire, mais bien parallèle au méridien magnétique. Au reste, cette position horizontale que prend le plan du courant est parfaitement d'accord avec la direction verticale qu'affecte l'aiguille d'inclinaison quand son axe est dans le méridien magnétique, ou, ce qui revient au même, quand le plan dans lequel elle se meut est perpendiculaire à ce méridien.

L'hypothèse d'Ampère sur la nature du magnétisme terrestre rend donc compte de la manière la plus satisfaisante de l'action de la terre sur les courants mobiles. Peut-on en dire autant quant à l'action de la terre sur les aiguilles aimantées? Il semble qu'on peut répondre que oui, puisque tous les phénomènes magnétiques s'expliquent parfaitement bien, en supposant que les aimants ne sont qu'un assemblage de courants; dès lors la seconde action rentre dans la première. Cependant ces courants sont moléculaires, et ceux avec lesquels nous avons opéré sont d'une grandeur finie. C'est vrai, mais à la distance à laquelle les courants terrestres se trouvent des courants mobiles, il n'y a pas une grande différence entre un courant de quelques centimètres de longueur et le courant moléculaire d'un aimant. Toutefois, nous ne dissimulerons pas qu'il n'y ait encore des expériences à faire pour bien établir, sur des bases solides, l'identité entre la cause qui détermine la direction des courants électriques et celle qui produit la direction des aimants.

Il nous resterait à examiner jusqu'à quel point l'existence de courants terrestres, dirigés de l'est à l'ouest, au-dessous de la surface de la terre, est probable; à quelle cause on peut les attribuer; s'ils sont conciliables avec les autres phénomènes de physique terrestre; si enfin on peut les percevoir directement. Ce sont autant de questions intéressantes que nous traiterons dans le chapitre de la cinquième partie qui a pour objet l'*électricité ou le magnétisme terrestre*. Nous verrons alors quelle est l'hypothèse sur la nature de ce magnétisme la plus propre à rendre

compte à la fois de son action sur les courants électriques et sur l'aiguille aimantée.

§ 6. Lois des actions électro-dynamiques.

Il nous reste, comme nous l'avons dit p. 256, à montrer, par des mesures précises et par l'application du calcul et des lois de la mécanique, comment l'hypothèse d'Ampère des courants moléculaires, peut rendre compte d'une manière rigoureuse de tous les phénomènes électro-dynamiques, y compris les magnétiques. Pour soumettre au calcul cette hypothèse et en déduire ainsi tous les effets de l'action mutuelle des aimants sur les courants et des aimants les uns sur les autres, il faut commencer par calculer l'action mutuelle de deux courants moléculaires seulement, ou, ce qui revient au même, de deux portions infiniment petites de courants. Or ce calcul exige pour points de départ, outre la loi générale de l'attraction et de la répulsion suivant le sens des courants, que nous avons déjà établie, certains principes fournis par l'expérience, et l'expérience ne peut se faire sur des portions infiniment petites de courants. Mais, au moyen d'un calcul aussi rigoureux qu'ingénieux, M. Ampère a pu ramener les principes nécessaires à établir sur des courants infiniment petits à des cas d'équilibre fournis par l'action mutuelle de courants finis. Ces cas d'équilibre, au nombre de quatre, permettent de déterminer les lois auxquelles l'action mutuelle des courants infiniment petits doit nécessairement obéir pour qu'ils puissent se réaliser. Ces lois une fois obtenues, le calcul conduit à des conséquences conformes à l'expérience sur les effets que doit produire l'assemblage de ces courants, tel qu'il a lieu dans les aimants et dans les hélices électriques.

Voici les quatre cas d'équilibre, fournis par l'expérience, qui servent de base aux calculs sur les courants infiniment petits.

Premier cas d'équilibre. — Deux courants finis, égaux et contraires, exercent sur un troisième, situé à la même distance des deux premiers, une action nulle, l'action attractive de l'un étant égale à l'action répulsive de l'autre. Pour démontrer ce

principe, il faut se servir d'un fil de métal recouvert de soie qu'on replie à son milieu sur lui-même, de manière que ses deux moitiés parallèles l'une à l'autre soient en contact dans toute leur étendue; les deux extrémités, qui se trouvent l'une à côté de l'autre, sont mises en communication l'une avec le pôle positif, l'autre avec le pôle négatif de la pile, de sorte que les deux moitiés sont parcourues par le même courant dans des sens contraires. On présente au courant astatique vertical ou horizontal du flotteur ce double courant, qui se compose de deux courants égaux et contraires, situés à la même distance du courant mobile, et l'action est tout à fait nulle. On peut également ajuster ce double courant à l'appareil de la fig. 82 en lui donnant la forme de la fig. 116.

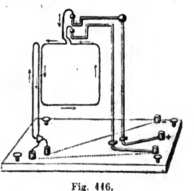


Fig. 116.

Second cas d'équilibre. — L'action exercée par un conducteur rectiligne sur un courant mobile est exactement égale à celle qu'exerce sur le même courant un conducteur plié et contourné d'une manière quelconque, mais compris entre les mêmes limites, pourvu que les courants qui traversent les deux conducteurs finis soient les mêmes ou aient la même intensité.

On vérifie l'exactitude de ce principe au moyen de l'appareil de la fig. 89, auquel on suspend le conducteur astatique vertical. On place pour conducteur fixe un système de deux fils dont l'un est rectiligne et l'autre contourné en forme de languette, de zigzag ou de toute autre manière (fig. 117). On les arrange de façon que la branche verticale du conducteur astatique mobile

soit située entre eux et que le courant qui le parcourt successivement ait la même direction dans chacun d'eux, mais en même temps de manière que cette direction, qui leur est commune,

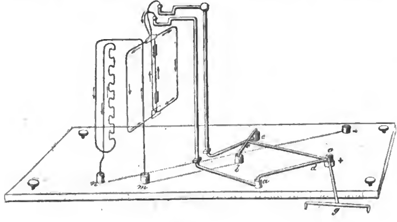


Fig. 117.

soit contraire à celle du courant dans la branche mobile. On voit alors celle-ci être repoussée également par les deux conducteurs fixes et se maintenir exactement au milieu entre eux, preuve que leur action est égale. Il est important que les sinuosités du conducteur contourné, désigné par Ampère sous le nom de sinueux, ne soient pas trop grandes comparativement à la distance des conducteurs au courant mobile; elles peuvent cependant, pourvu que cette distance soit suffisamment considérable, se trouver les unes dans des plans différents de ceux où sont les autres. On peut également, en faisant tourner le *commutateur* [1]

[1] Nous appelons *commutateur* tout appareil destiné à changer la direction du courant dans un ou plusieurs conducteurs, sans qu'il soit nécessaire de déplacer les pôles de la pile. Celui dont nous faisons usage ici est le même que nous avons décrit à la page 222. Il en existe plusieurs autres parmi lesquels il en est où l'on se dispense de mercure en se contentant du simple contact de deux parties métalliques mobiles à frottement juste l'une contre l'autre. Ils sont aussi plus ou moins compliqués selon qu'il s'agit de changer le sens du courant dans une partie du circuit sans le changer dans le reste, ou de le changer dans tout le système des conducteurs également. Nous aurons plus d'une fois l'occasion de faire usage des différentes espèces de commutateurs.

de manière que la branche *a d* plonge dans la capsule *c*, et que la branche *g* réunisse les deux capsules *a* et *b*, faire passer le courant dans le même sens dans les deux branches verticales fixes, la sinueuse et la rectiligne, et dans la mobile. Aussi si cette dernière est située bien exactement entre les deux autres ; elle reste parfaitement en équilibre, étant également attirée par chacune d'elles ; seulement l'équilibre est instable dans ce cas-ci, tandis qu'il était stable dans le premier. Ce second cas d'équilibre a servi à M. Ampère à montrer qu'on peut appliquer aux courants la loi de la décomposition et de la composition des forces ordinaires, soit la loi du parallélogramme des forces ; ce qu'on ne pouvait conclure *à priori*, vu la nature toute particulière des forces qui émanent des courants électriques, et qui ne sont point semblables aux forces ordinaires.

Troisième cas d'équilibre. — Un circuit fermé, de forme quelconque, ne peut mettre en mouvement une portion quelconque d'un courant formant un arc de cercle dont le centre est sur un axe fixe autour duquel il peut tourner librement, axe qui est perpendiculaire au plan du cercle auquel l'arc appartient. Dans cette expérience délicate, il faut que l'arc de cercle puisse se

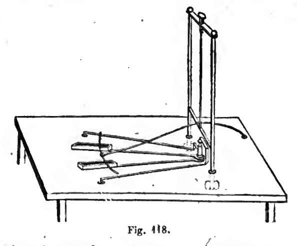


Fig. 118.

mouvoir seul et sans les conducteurs qui le mettent dans le circuit ; pour cela on se sert de deux canaux remplis d'une quan-

tité de mercure telle que le niveau du liquide s'élève par la capillarité au-dessus des parois des canaux. Le conducteur en forme d'arc de cercle, fixé par son milieu à l'extrémité d'une tige, horizontale comme lui, qui part de l'axe situé au centre du cercle dont l'arc fait partie, repose délicatement, par deux de ses points, sur la surface du mercure de chaque canal, de manière à être simplement en contact avec elle (fig. 118). Le pôle positif de la pile communique avec le mercure de l'un des canaux, et le négatif avec le mercure de l'autre; de cette façon, le conducteur en arc de cercle sert à fermer le circuit, et il en est la seule partie mobile. On lui présente à une certaine distance un fil métallique formant un polygone ou une courbe fermée, et de plus traversé par un courant. De quelque manière que l'on place ce conducteur fixe par rapport au mobile, aucune action ne se fait apercevoir.

Quatrième cas d'équilibre. — On a trois conducteurs circulaires situés dans un même plan, un plan horizontal par exemple, disposés de façon que celui du milieu soit mobile autour d'un axe situé en dehors de la circonférence et auquel il est lié par une branche horizontale soudée en un point de cette circonférence, tandis que les deux extrêmes sont fixes (fig. 119).

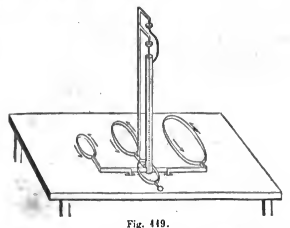


Fig. 119.

Si ces trois conducteurs circulaires sont situés de façon que leurs centres soient sur la même ligne droite, si de plus les dis-

tances de ces centres sont respectivement proportionnelles aux rayons des cercles, c'est-à-dire si le rapport du rayon du premier cercle au rayon du second et celui du rayon du second au rayon du troisième, sont entre eux comme la distance du premier centre au second est à la distance du second centre au troisième; le conducteur intermédiaire mobile sera en équilibre entre les deux extrêmes fixes, quand ils seront tous les trois traversés par un courant électrique dirigé chez tous dans le même sens et ayant la même intensité dans chacun. L'inspection seule de la figure (fig. 119) suffit pour faire comprendre la manière dont on met les trois conducteurs circulaires dans le circuit électrique, tout en donnant une grande mobilité à celui du milieu.

Au moyen de ces quatre cas d'équilibre, Ampère a réussi, non-seulement à déterminer la forme de l'expression mathématique de la force que deux éléments de courants voltaïques exercent l'un sur l'autre, mais à trouver la valeur des quantités constantes qui entrent dans cette expression et à en déduire en particulier que la force elle-même est en raison inverse du carré de la distance entre les deux éléments. On se rappelle que les expériences de Biot et de Savart avaient conduit à la même loi pour l'action d'un élément de courant sur un élément d'aimant, ce qui établit une analogie de plus entre un élément d'aimant et un élément de courant électrique[1].

Une fois parvenue à l'expression mathématique de l'action de deux éléments de courant, Ampère en a déduit l'action de l'assemblage de plusieurs courants élémentaires, soit sur un assemblage semblable, soit sur un courant fini ou indéfini. Les résultats du calcul se sont constamment trouvés d'accord avec ceux qu'avait fourni l'expérience. Mais le cas le plus important est celui qui comprend l'action mutuelle de deux *solénoïdes;* Ampère désigne par ce nom un système de courants fermés très-petits, ayant leurs centres également espacés sur une ligne droite ou sur une courbe qu'il nomme *directrice* du solénoïde.

[1] Voyez la note finale F, pour les calculs relatifs à l'action mutuelle des courants électriques.

L'aimantation, en imprimant des directions fixes aux courants électriques qui enveloppent les molécules des corps, produit des solénoïdes, de telle sorte qu'un solénoïde est le squelette magnétique des substances aimantées, l'aimant étant un assemblage de courants fermés.

Ampère avait démontré que l'action d'un solénoïde ne dépend que de la position de ses extrémités et nullement de la forme de son axe, mais il n'avait pas réussi à déduire du calcul appliqué aux courants des solénoïdes, toutes les mêmes conséquences qu'il avait déduites de cette même application faite aux courants moléculaires qui, suivant lui, constituent les aimants, conséquences toutes parfaitement d'accord avec les propriétés des aimants. M. Savary a comblé cette lacune ; il est parti du principe que, si la formule d'Ampère est vraie quand elle s'applique aux courants moléculaires, elle doit être juste également quand elle s'applique aux courants circulaires des solénoïdes, et que le calcul doit aussi donner des résultats identiques avec ceux de l'expérience. Cet habile physicien a trouvé que tel était le cas en effet, et il a montré de plus que les solénoïdes ou cylindres électro-magnétiques d'un très-petit diamètre agissent à des distances très-grandes par rapport à ce diamètre, comme des aimants dont les pôles seraient situés aux extrémités même de ces cylindres. Ce résultat établit donc une identité complète entre un solénoïde et un filet magnétique, car celui-ci étant composé de courants moléculaires, il est clair que, quelle que soit la distance à laquelle il agit, le diamètre de ses courants est toujours infiniment petit par rapport à cette distance. Nous ne suivrons pas M. Savary dans les autres conséquences qu'il a tirées de ses calculs ; nous nous bornerons à dire qu'elles s'accordent toutes avec les résultats qu'avait déjà fournis l'étude expérimentale du magnétisme, en sorte que, sous les conditions énoncées, un solénoïde représente un véritable aimant. Ainsi, en particulier, on établit par le calcul fondé uniquement sur les lois de l'électro-dynamique que les pôles de deux solénoïdes se repoussent s'ils sont de même nom, c'est-à-dire si les courants s'y meuvent dans le même sens, et s'attirent s'ils sont de noms contraires, ce qui semble en

contradiction avec la loi de l'action mutuelle de deux courants, contradiction qui n'est qu'apparente et qui tient à ce qu'ici ce ne sont pas simplement deux courants élémentaires, mais bien deux assemblages de courants qui agissent l'un sur l'autre. On parvient aussi à établir qu'un solénoïde n'a aucune action si sa direction est une courbe fermée, résultat d'accord avec celui que fournit une lame d'acier aimantée qui, sous la forme d'anneau fermé, ne présente plus de trace de magnétisme.

La théorie d'Ampère, quoique appuyée sur des calculs rigoureux, manquait en certains points de démonstrations expérimentales quand en 1848 M. Weber entreprit d'en compléter les preuves par quelques expériences plus directes et plus précises. Abordant la question directement, il a réussi à construire un appareil qui permet de mesurer avec une grande précision l'action mutuelle de deux solénoïdes ou plutôt de deux anneaux électro-dynamiques; puis comparant les résultats numériques de l'observation avec ceux que lui fournit le calcul appliqué à la formule d'Ampère pour l'action de deux éléments de courant, il a trouvé entre ces résultats l'accord le plus parfait.

L'appareil de Weber se compose de deux anneaux formés de fils de cuivre recouverts de soie, enroulés d'une manière parfaitement régulière. L'intérieur de l'un des anneaux renferme un espace assez grand pour que l'autre puisse s'y mouvoir librement. Quand on fait passer un courant électrique à travers le fil de chacun des deux anneaux, le fixe qui est extérieur, tend à faire tourner le mobile qui est intérieur avec une force qui est à son maximum, lorsque leurs deux centres coïncident et que les plans de leurs courants sont perpendiculaires l'un à l'autre. Le diamètre des deux anneaux est l'axe de rotation; il a une direction verticale. L'anneau mobile est soutenu par deux fils métalliques très-fins qui n'en supportent chacun que la moitié, de façon à être tendus également. Ces fils mis en communication par leur extrémité inférieure avec les deux bouts du fil de l'anneau mobile, servent à y transmettre le courant au moyen de deux supports métalliques auxquels ils sont attachés à leurs extrémités supérieures; l'arrangement des conducteurs permet de mettre également dans le circuit le fil de

l'anneau fixe, sans que le plus léger frottement vienne troubler le mouvement du mobile.

Les deux fils de suspension servent encore à mesurer la force avec laquelle les deux anneaux agissent l'un sur l'autre, vu que chaque fois que le mobile se déplace d'un certain angle,

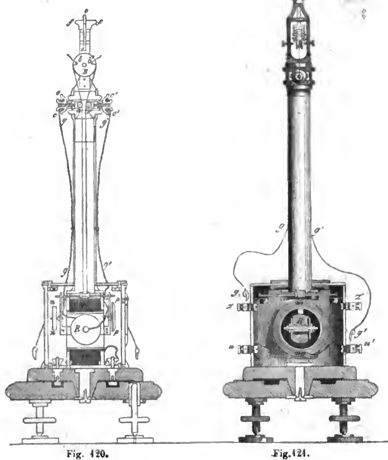


Fig. 120. Fig. 121.

il se produit un mouvement de rotation proportionnel au sinus de cet angle. C'est une application du principe dont Gauss s'est servi dans la magnétomètre bifilaire que nous décrirons dans le

chapitre du magnétisme terrestre. L'anneau mobile porte un miroir qui sert à la mesure des petits angles au moyen d'une division fixe qui y est réfléchie et qu'on regarde avec une lunette. Les figures 120 et 121 représentent deux coupes verticales à angle droit l'un de l'autre de l'appareil de Weber, et la fig. 122 une coupe horizontale de l'instrument vu de haut en bas. Les deux fils de suspension partant de la bobine R qu'ils supportent, viennent s'appuyer contre deux petites poulies de métal *a* et *a'* et se fixer autour de deux petites tiges *b* et *b'* implantées sur une poulie d'ivoire B. Cette poulie peut être abaissée ou élevée au moyen de la vis *e e'* qui se meut dans l'écrou *f f'*, de sorte qu'on peut amener l'anneau mobile dans la position la plus convenable par rapport au fixe au milieu duquel il est suspendu et dont *m m'* représente une section transversale. La poulie *B* mobile autour d'un pivot central se tient en équilibre au moyen de l'action égale qu'exercent en *b* et *b'* les deux fils de métal qui portent l'anneau mobile, dont le poids est ainsi uniformément réparti entre les deux fils. Le miroir *n n* et son contre-poids *p p* font saillie hors du cadre de l'anneau fixe, ce qui nécessite, pour éviter l'agitation de l'air, que tout l'appareil soit recouvert d'une enveloppe de bois munie de deux larges ouvertures fermées par une plaque de verre pour qu'on puisse suivre les mouvements du miroir, et dont la partie supérieure est également une glace de verre qui laisse passer le tube où sont les deux fils de suspension, et permet de voir la division circulaire, ainsi que l'index *i i* que porte l'anneau mobile (Voyez fig. 122). La seconde coupe verticale (fig. 121) permet de suivre très-bien la marche du courant ; les quatre boutons métalliques *u*, *u'*, *z* et *z'* fixés contre l'enveloppe de bois servent à fermer le circuit; *u* et *u'* sont en com-

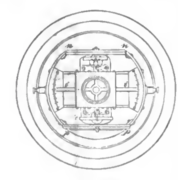


Fig. 122.

munication avec les deux extrémités du fil de l'anneau fixe, en sorte que le courant parti de u arrive en u', après avoir traversé ce fil, monte le long du fil $g\, g'$, arrive à l'écrou $c'\, c'$, puis à la petite poulie a', d'où il descend par le fil de suspension dans l'anneau mobile, puis passe au second fil de suspension d'où il parvient à la poulie a, de là, par le second écrou $c\, c$ au fil $g\, g$ et au bouton z qui communique avec le pôle négatif de la pile. En combinant convenablement les conducteurs au moyen des quatre boutons, on peut facilement changer le sens du courant dans l'un des anneaux seulement, ou dans tous les deux.

Ajoutons que le fil de l'anneau mobile a 200 mètres de longueur faisant 1,200 tours, et celui du fixe 300 mètres faisant seulement 900 tours. Les deux fils de suspension, qui sont très-fins, sont d'argent et ont été rougis au feu; ils ont un demi-mètre de longueur depuis l'anneau jusqu'aux poulies a et a'.

Au moyen de cet appareil qu'il a appelé *dynamomètre*, Weber s'est d'abord assuré, en faisant successivement passer dans les fils des deux anneaux des courants d'une intensité différente et en observant simultanément les déviations du dynamomètre et celles d'un galvanomètre placé aussi dans le circuit, que *la force électro-dynamique produite par l'action réciproque de deux fils conducteurs qui transmettent des courants d'égale intensité est proportionnelle au carré de cette intensité.* C'est la démonstration expérimentale du principe admis par Ampère, mais non prouvé directement, que l'action mutuelle de deux courants est proportionnelle au produit de leurs intensités respectives. L'influence de la distance mutuelle des deux anneaux, mesurée par la distance de leurs centres respectifs, a été également déterminée par l'expérience directe suivant le même système appliqué par Gauss aux aimants pour démontrer la loi fondamentale de l'action du magnétisme, et a conduit Weber à l'une des conséquences les plus générales et les plus importantes de l'électro-magnétisme, savoir que ce sont *les mêmes lois qui régissent les actions électro-dynamiques et les actions magnétiques à distance.* Cette loi établit d'une manière directe et expérimentale l'identité entre les aimants et les solénoïdes que M. Ampère, et après lui M. Savary, avaient démontrée seulement par des calculs

basés sur des expériences indirectes. La détermination de cette loi a exigé une longue série d'expériences dans lesquelles il fallait pouvoir varier la position de l'anneau fixe par rapport au mobile; ce dernier était alors le plus grand et renfermait l'autre. Les deux anneaux étaient toujours disposés de façon que leurs axes fussent dans le même plan horizontal; mais leurs centres ne coïncidaient pas, sauf quand la distance des anneaux était égale à zéro. Hors ce dernier cas, il fallait déterminer non-seulement la grandeur de la distance entre les deux centres, mais encore l'angle que formait la ligne droite passant par ces deux centres avec l'axe de l'anneau mobile. Enfin des observations nombreuses donnent des résultats numériques parfaitement d'accord avec ceux que fournit l'application du calcul au principe fondamental de l'électro-dynamique, relativement *au moment de rotation électro-dynamique qu'exerce l'anneau fixe sur l'anneau mobile quand on fait passer, par les deux anneaux, un courant d'une intensité donnée* [1].

[1] Voyez la note finale G pour les calculs et les résultats numériques des expériences de Weber.

Les principaux travaux cités dans ce chapitre sont :

Oersted. — *Ann. de ch. et de phys.* T. xiv (1820), p. 417, et *Bibl. univ.* T. xiv, p. 274, et xv, p. 137.

Ampère. — *Ann. de ch. et de phys.* T. xv, xvi, xviii, xx, xxii, xxvi, xxix, xxx, et xxxvii, et *Bibl. univ.*, t. xvi, xvii, xix, xx et xxvii. — (Années 1820 à 1828). — *Théorie des phénomènes électro-dynamiques*, 1 vol. in-4°. Paris, novembre 1826.

G. de la Rive. — T. xvi, p. 201, xvii, p. 188, xviii, p. 269.

Davy. — *Ann. de ch. et de phys.* T. xxv (1824), p. 64, et *Bibl. univ.*, t. xxv, p. 98.

Faraday. — *Ann. de ch. et de phys.* T. xviii (1821), p. 337.

Savary. — *Ann. de ch. et de phys.* T. xxii (1823), p. 91, et xxiii, p. 413.

Masrh. — *Bibl. univ.* T. xx (1822), p. 258.

A. de la Rive. — *Bibl. univ.* T. xxi (1812) p. 29, et *Ann. de ch. et de phys.*, t. xxi, p. 24.

Weber. — *Ann. der Physik.* T. lxxiii (1848), p. 193.

CHAPITRE III.

DE L'AIMANTATION PAR L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

§ 1. Effet du courant sur les corps magnétiques.

Nous ne nous sommes occupés, dans le chapitre précédent, que de l'action mutuelle des courants et des aimants, et de celle des courants les uns sur les autres. Maintenant nous allons étudier l'action de l'électricité dynamique sur les corps magnétiques, c'est-à-dire susceptibles d'être aimantés, mais non aimantés. C'est M. Arago qui le premier, immédiatement après la découverte d'Oerstedt, montra qu'un fil de cuivre ou d'un métal quelconque acquiert, quand il est traversé par un fort courant électrique, la propriété d'attirer et de retenir autour de lui, sous forme d'une enveloppe cylindrique, une certaine quantité de limaille de fer. Aussitôt que le courant cesse de passer, la limaille tombe; le fil en reprend de nouveau dès que le courant recommence à passer. Cette expérience, antérieure à toutes celles d'Ampère, est la première qui établisse d'une manière péremptoire que le courant électrique imprime aux conducteurs, quand il est transmis par eux, des propriétés tout à fait analogues à celles des aimants, et non pas seulement à celles des corps magnétiques; en d'autres termes, qu'il les aimante et ne les rend pas simplement susceptibles d'être aimantés. En effet, la limaille de fer est aimantée par le courant comme elle le serait par un aimant, et est en conséquence attirée par le fil métallique qui transmet ce courant.

M. Arago ayant ensuite essayé d'aimanter une aiguille d'acier trouva que, pour lui imprimer un magnétisme plus prononcé, il fallait remplacer le conducteur rectiligne par un conducteur tourné en hélice, dans l'axe de laquelle on place l'aiguille. L'influence remarquable de cette forme, donnée au

conducteur, découverte par M. Arago, fut un trait de lumière pour M. Ampère, et contribua sans aucun doute à lui suggérer plus tard sa théorie de la constitution des aimants. M. Arago réussit à aimanter une aiguille, aussi bien par la décharge d'une machine électrique et encore mieux par celle d'une bouteille de Leyde, qu'au moyen de ce courant.

Davy avait, de son côté, fait voir qu'on peut également aimanter une aiguille en la plaçant transversalement sur un fil de métal traversé par un courant voltaïque ou par une décharge électrique.

On n'a pas tardé à démontrer que l'emploi des courants électriques, excellent pour aimanter du fer doux, dont la force coercitive est presque nulle, est insuffisant pour imprimer un magnétisme puissant à des aiguilles d'acier dont la force coercitive ne peut être complétement vaincue, surtout si elles sont trempées, que par la décharge d'une ou de plusieurs bouteilles de Leyde.

Nous allons donc successivement étudier l'aimantation de l'acier opérée essentiellement par des décharges électriques, celle du fer doux qu'on produit surtout par les courants électriques, et les phénomènes divers, principalement moléculaires, que met en évidence l'aimantation développée par l'électricité dynamique.

§ 2. Aimantation de l'acier par l'électricité dynamique.

Quand on aimante une aiguille d'acier en faisant passer la décharge ou le courant à travers le fil d'une hélice, il faut avoir soin de placer l'aiguille dans un tube de verre, autour duquel le fil métallique est tourné, afin d'éviter que, par le contact de l'acier avec ce fil, l'électricité ne passe à travers l'aiguille au lieu de faire le tour des spires. Si l'on examine la position des pôles nord et sud, dans une aiguille ainsi aimantée, on trouve qu'elle indique, en admettant la théorie d'Ampère, que la décharge a déterminé dans l'acier des courants dirigés dans le même sens que celui qui a produit l'aimantation, ce qui doit être dans cette théorie, puisque l'aimantation consiste à donner une direction uniforme aux courants électriques préexistants

autour des particules de l'acier ou du fer. Cet effet est produit de la manière la plus directe et la plus avantageuse par l'action de courants extérieurs, disposés comme doivent l'être dans le corps magnétique quand il sera aimanté, les courants moléculaires, et qui obligent ces derniers à se placer dans le même sens qu'eux-mêmes, et par conséquent parallèlement les uns aux autres.

Indépendamment de la direction suivant laquelle chemine la décharge, le sens dans lequel l'hélice est tournée influe naturellement sur le sens des courants, et par conséquent sur la position des pôles magnétiques. Dans une hélice *dextrorsum*, c'est-à-dire dans laquelle le fil s'enroule par la droite, le pôle sud de l'aiguille est toujours à l'extrémité par où entre la décharge, soit le courant, ou, ce qui revient au même, à l'extrémité qui communique avec l'électricité positive. Dans l'hélice *sinistrorsum*, c'est-à-dire dans laquelle le fil s'enroule vers la gauche, c'est le pôle nord qui est à l'extrémité par où pénètre l'électricité positive. C'est encore une conséquence rigoureuse de la théorie d'Ampère, ainsi que le démontre le sens du courant (fig. 123). M. Arago ayant enroulé autour du même tube un long fil de manière à en faire plusieurs hélices contraires les unes à la suite des autres, ayant placé en dedans une longue aiguille d'acier, trouva, après avoir fait traverser au système des hélices une forte décharge ou un courant énergique, que l'aiguille était aimantée, mais présentait un point conséquent à la jonction de chaque hélice. Avec deux hélices contraires, on a le même pôle aux deux extrémités de l'aiguille, et un seul pôle contraire au milieu, c'est-à-dire trois pôles; avec trois hélices, on a des pôles contraires aux deux extrémités et deux points conséquents entre deux, et ainsi de suite. M. Arago a reconnu encore que si l'hélice est longue par rapport à son diamètre, et si les spires sont très-rapprochées, la position de l'aiguille dans l'intérieur du tube n'influe pas sur le degré de magnétisme qu'elle prend, pourvu qu'elle soit toujours placée parallèlement

Fig. 123.

à l'axe. L'aimantation est très-faible si on place l'aiguille extérieurement à l'hélice, lors même qu'on a soin de la mettre aussi près que possible et dans une position parallèle à l'axe.

M. Nobili a essayé d'employer pour l'aimantation une spirale plate au lieu d'une hélice comme Arago, ou d'un fil droit comme Davy. Il avait placé entre les spires isolées les unes des autres, et perpendiculairement à leur plan, des aiguilles d'acier; et il faisait passer une décharge électrique à travers tout le fil de la spirale. Les aiguilles situées près du centre se trouvèrent aimantées en sens contraire de celui dans lequel étaient aimantées les aiguilles qui en étaient éloignées, et il y avait un point à une certaine distance du centre où l'aimantation était nulle. Il faut remarquer que, dans cette expérience, chaque aiguille se trouve placée entre deux courants qui, allant dans le même sens, doivent lui donner une aimantation différente, car, pour que l'action des courants conspirât, il faudrait que le courant situé d'un côté de l'aiguille allât en sens contraire du courant situé de l'autre. L'aimantation définitive dépend donc de l'intensité relative des deux courants dont l'action individuelle est opposée. Nous verrons plus loin pourquoi près du centre c'est l'un qui l'emporte, et pourquoi c'est l'autre près du bord de la spirale. Il nous faut auparavant analyser ce genre d'effets dans des cas moins compliqués. Cette analyse a été faite d'abord par M. Savary, puis complétée par M. Abria. Nous allons exposer les résultats remarquables auxquels ces deux physiciens sont successivement parvenus.

Le premier de ces résultats est que l'intensité et même le sens de l'aimantation opérée sur une aiguille d'acier, par une décharge transmise à travers un fil métallique rectiligne, dépend de la distance de l'aiguille à ce fil, de telle façon que l'intensité, loin de diminuer constamment avec la distance, augmente avec elle à partir d'un certain point où elle est à son minimum, et que du même côté du fil pour une même direction de la décharge, les mêmes pôles magnétiques se trouvent placés à une des extrémités ou à l'autre, suivant la distance de l'aiguille au conducteur. Ainsi, près du fil les pôles sont placés conformément à la théorie, mais à une distance plus grande et

par le seul fait de cette augmentation de distance, ils se trouvent placés en sens contraire. Le fil métallique dont se servait M. Savary pour transmettre la décharge était de platine, avait deux mètres de longueur et un quart de millimètre de diamètre. Les aiguilles d'acier, toutes aussi semblables que possible et fortement trempées, avaient 15 millimètres de longueur et un demi millimètre de diamètre. On jugeait de l'intensité du magnétisme qu'elles avaient acquis par le nombre d'oscillations qu'elles faisaient sous l'influence du magnétisme terrestre. La batterie électrique d'où partait la décharge avait 22 pieds carrés de surface. Pour éviter que les aiguilles ne s'influençassent mutuellement, on ne les avait pas placées verticalement les unes au-dessus des autres, mais on avait eu soin, tout en les mettant à différentes hauteurs au-dessus du fil, de les éloigner dans la direction horizontale; ce qui était facile, vu la longueur du fil déchargeur.

AIGUILLES EN CONTACT AVEC LE FIL pendant la décharge.	DISTANCE DU FIL en millimètres.	DURÉE DE 60 oscillations.	SENS DE l'aimantation.
1re	mm	52",4	Positive.
2e	1 ,2	1', 3 ,8	idem.
3e	2 ,3	1 ,12 ,8	Négative.
4e	3 ,7	44 ,6	idem.
5e	5 ,0	40 ,0	idem.
6e	6 ,0	41 ,8	idem.
7e	7 ,4	44 ,8	idem.
8e	8 ,5	58 ,2	idem.
9e	9 ,7	1 ,20 ,1	idem.
10e	10 ,9	1 ,32 ,0	Positive.
11e	11 ,8	1 ,18 ,6	idem.
12e	12 ,5	1 , 1 ,0	idem.
13e	13 ,8	49 ,6	idem.
14e	16 ,3	38 ,2	idem.
15e	18 ,7	33 ,8	idem.
16e	21 ,0	31 ,3	idem.
17e	23 ,8	29 ,5	idem.
18e	28 ,5	30 ,8	idem.
19e	34 ,0	29 ,8	idem.
20e	46 ,0	35 ,9	idem.
21e	70 ,0	55 ,6	idem.
22e	100 ,0	1 ,27 ,6	idem.
23e	130 ,0	1 ,48 ,0	idem.

Le tableau ci-dessus indique, pour chaque aiguille, à côté de sa distance verticale au-dessus du fil, la durée de 60 oscillations et le sens du magnétisme qu'elle a acquis par l'effet de la décharge. Le sens positif est celui qui correspond à la direction du courant conformément à la théorie, le sens négatif est le sens opposé à cette direction.

On voit d'après ce tableau, qu'à $2^{mm},5$ de distance, le sens de l'aimantation a déjà changé, quoique au contact et à $1^{mm},2$ il fût positif. A 11 millimètres de distance, il est redevenu positif et il l'est resté jusqu'à 130. Quant à l'intensité, elle est à son maximum pour les aiguilles aimantées positivement, au contact et à 30 millimètres de hauteur; le second maximum est même sensiblement plus fort que le premier. Le maximum a lieu pour les aiguilles aimantées négativement à 5 millimètres du fil. Les minima se trouvent aux distances auxquelles ont lieu les changements de signes. Dans une autre expérience, où le fil de platine avait été réduit à une longueur moitié moindre, d'un mètre seulement, Savary obtint quatre changements dans le sens de l'aimantation. Le dernier maximum se trouva à 4 centimètres de hauteur, tandis qu'il était à 3 cenmètres dans les premières expériences.

Si, sans changer la longueur du fil déchargeur, on change seulement son diamètre, on modifie les distances auxquelles ont lieu les changements dans le sens de l'aimantation; avec un fil d'un diamètre très-fin, par exemple de $\frac{1}{8}$ de millimètre, il n'y a plus de ces changements, et le maximum d'intensité est à 11 millimètres, c'est-à-dire à une distance cinq fois moindre que lorsqu'on opère avec un fil de platine trois fois plus gros.

L'intensité de l'aimantation, toutes les autres circonstances restant les mêmes, est d'autant plus grande que la longueur du fil est moindre par rapport à son diamètre. Cet accroissement a cependant une limite, et un fil d'un mètre donne le maximum absolu le plus élevé quand il a $\frac{1}{8}$ de millimètre de diamètre; à la distance à laquelle a lieu ce maximum, c'est-à-dire à 11 millimètres, l'aiguille est aimantée à saturation; pour des longueurs plus grandes, l'intensité est moindre. Les maxima relatifs à chaque longueur se trouvent d'autant plus près du fil

que celui-ci est plus long. Il est inutile de faire remarquer que dans chaque cas, l'intensité absolue des effets augmente avec celle de la décharge.

L'influence qu'exercent la longueur et le diamètre du fil conducteur semble tenir au retard plus ou moins considérable que ces deux circonstances exercent sur la décharge; car dans un circuit formé de trois fils de diamètres inégaux et joints bout à bout, l'effet de la décharge est le même, quel que soit celui des trois fils au-dessus duquel l'aiguille est placée. Ce résultat provient de ce que, dans toutes les parties d'un même circuit, la décharge chemine avec la même vitesse, quelque différents que soient les divers conducteurs dont ce circuit se compose, pourvu qu'ils soient placés les uns à la suite des autres, et parcourus tous successivement par la décharge ou le courant.

La trempe et la grosseur des aiguilles d'acier exercent une influence très-marquée sur les résultats; les aiguilles non trempées ne présentent aucun changement de signe, tandis que celles qui sont trempées roides en présentent au moins trois. De même, si le diamètre de l'aiguille est un peu considérable, le maximum d'aimantation a lieu au contact, et il y a un décroissement d'intensité continu à mesure qu'on l'éloigne du fil. Une aiguille trempée, mais d'un gros diamètre, se trouve se rapprocher ainsi d'une aiguille non trempée; ce qu'on peut expliquer en remarquant que la trempe n'agit que sur la surface, et que dans une grosse aiguille, la surface est comparativement à la masse totale beaucoup moindre que dans une petite.

M. Savary a étudié aussi l'aimantation opérée par les hélices, et il a ajouté de nouveaux faits à ceux qu'avait déjà observés M. Arago. Avec un fil de laiton de 40^{mm},2 de longueur et de 0^{mm},8 de diamètre, roulé en hélice autour d'un tube de bois de 6 à 7 millimètres de diamètre, de manière que le pas de l'hélice eût 3 millimètres de hauteur environ, il a obtenu six changements dans le sens de l'aimantation, en employant des décharges d'une intensité successivement croissante. Les aiguilles étaient cependant toutes semblables, trempées roides, de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre et de 15 de longueur. Si l'on augmente la longueur

totale du fil sans changer la partie roulée en hélice, on finit par n'avoir plus de renversements dans l'aimantation, mais seulement des variations dans l'intensité, à mesure que s'accroît celle de la décharge. La longueur des aiguilles d'acier placées dans l'intérieur d'une hélice n'influe pas sur le sens du magnétisme, mais seulement sur son intensité. Des fragments de longues aiguilles aimantées directement ont moins de magnétisme que n'en ont des fragments semblables qu'on a obtenus en brisant une aiguille aimantée préalablement par une décharge de même force.

Parmi les résultats auxquels est parvenu M. Savary, il nous en reste encore à signaler de non moins remarquables que ceux que nous venons d'exposer; il s'agit de l'influence qu'exerce sur l'aimantation opérée par l'électricité l'interposition de certains milieux entre le fil qui conduit la décharge et l'aiguille d'acier soumise à son action. M. Arago avait observé que le bois, le verre et en général les corps isolants ne modifient en rien cette action; mais il n'en est plus de même si le corps interposé est conducteur de l'électricité. M. Savary a trouvé que, si l'on place dans une hélice deux aiguilles semblables, l'une sans enveloppe, l'autre entourée d'un cylindre épais de cuivre rouge isolé du fil des spires, la décharge qui aimante fortement la première ne produit aucun effet sur la seconde. Mais en diminuant peu à peu l'épaisseur de l'enveloppe, l'intensité des décharges restant la même, les aiguilles enveloppées commencent à éprouver une action qui devient de plus en plus sensible. Ce genre d'observation est facile à faire en employant pour enveloppes des lames d'étain, dont on peut diminuer ou augmenter l'épaisseur à volonté en les enroulant ou les déroulant. Il peut arriver même que, pour une certaine épaisseur, l'aiguille enveloppée acquière un magnétisme plus fort que l'aiguille sans enveloppe. Enfin, il est à remarquer que l'enveloppe change quelquefois le sens de l'aimantation. Ainsi, de trois aiguilles placées, l'une dans un cylindre de cuivre de 5 millimètres de rayon, la seconde, dans un cylindre d'étain de même grandeur, la troisième, sans enveloppe, la première fut la moins aimantée, faisant 60 oscillations en 2'35", la seconde, le

plus, les faisant en 45″ et la troisième en 1′52″. Cette dernière était aimantée en sens contraire des deux autres.

Il faut que le corps enveloppant forme une surface continue: s'il est en poudre, il ne produit plus aucun effet; il est vrai qu'à cet état, il n'est plus conducteur de l'électricité. Peu importe, du reste, que les lames enveloppantes soient séparées les unes des autres par des couches isolantes, ou soient immédiatement en contact; l'effet reste le même, pourvu que chacune d'elles soit continue. Le mercure se conduit comme les autres métaux; son influence est seulement un peu moins prononcée.

D'autres expériences ont été faites encore par M. Savary, en interposant, entre le conducteur rectiligne qui transmet une décharge et l'aiguille à aimanter, des plaques métalliques de différentes natures et de différentes épaisseurs; il en résulte ce fait curieux, c'est que pour des décharges très-faibles, une plaque conductrice, telle qu'une plaque de cuivre, affaiblit beaucoup l'aimantation, tandis qu'elle l'augmente si la décharge est forte. Une plaque mince et une plaque épaisse peuvent produire des effets très-différents pour une même intensité de la décharge, et il y a une certaine épaisseur avec laquelle l'effet est nul. Si l'on place les aiguilles sur la plaque conductrice et le fil qui conduit la décharge au-dessus, on trouve que la présence de la plaque augmente l'intensité de l'aimantation, d'autant plus qu'elle est plus épaisse. Cependant il y une certaine intensité de la décharge pour laquelle une plaque épaisse augmente et une plaque mince diminue l'aimantation. Pour des décharges encore plus fortes, il y a diminution, quelle que soit l'épaisseur, et même il arrive un point auquel l'influence de la plaque fait donner aux aiguilles un magnétisme contraire à celui que le courant seul développait. On voit par là que les effets sont très-différents et même opposés, suivant que la plaque est entre l'aiguille et le fil déchargeur, ou suivant que c'est l'aiguille qui est placée entre ce fil et la plaque.

M. Savary a répété, avec des courants électriques, la plupart des expériences qu'il avait faites avec des décharges, et il a trouvé que les effets que produisent ces deux formes sous lesquelles se présente l'électricité dynamique sont d'autant plus semblables,

que la pile a plus de tension et qu'elle est chargée avec un liquide moins conducteur. Du reste, les effets sont en général moins prononcés avec les courants qu'avec les décharges, surtout en ce qui concerne les changements qu'éprouve le sens de l'aimantation, lorsqu'il y a variation de la distance des aiguilles au fil conducteur. L'aimantation ne s'opère d'une manière bien prononcée, que si l'on place les aiguilles d'acier dans l'intérieur d'une hélice traversée par le courant. L'inflence des enveloppes conductrices se fait également sentir dans ce cas, mais ce qu'il y a de curieux, c'est qu'elle est d'autant plus sensible que la pile qui produit le courant est plus affaiblie.

Nous n'essayerons pas pour le moment de rattacher à aucune théorie les faits que nous venons d'exposer. Ceux qui sont relatifs à l'influence sur le sens et sur le degré de l'aimantation des milieux conducteurs, interposés ou ambiants, trouveront plus tard leur explication dans les phénomènes d'induction dont nous nous occuperons dans le chapitre V. Quant à l'influence extraordinaire qu'exerce la distance de l'aiguille au conducteur traversé par la décharge qui l'aimante, elle tient aussi en grande partie à la même cause; il est probable cependant qu'elle se lie également à cette réaction qu'exercent les magnétismes des molécules les uns sur les autres; réaction qui produit les points conséquents dans les procédés ordinaires d'aimantation, et qui dépend essentiellement des dimensions et du degré de trempe de l'acier, ainsi que de la manière dont on l'aimante.

M. Abria, dans ses recherches sur l'aimantation, au lieu d'employer les décharges électriques, a fait usage de courants produits par une pile à force constante. Il s'est assuré que le degré de trempe que possède une aiguille influe considérablement sur l'intensité magnétique qu'elle est susceptible d'acquérir dans les mêmes circonstances. Aussi, afin de se mettre à l'abri de cette influence, a-t-il pris toutes les précautions possibles pour donner aux aiguilles destinées aux expériences comparatives, un état de trempe aussi constant et régulier que possible, ce qui n'est pas difficile si on a soin de les chauffer toutes de la même manière, le même temps, et de les tremper

ensemble dans l'eau froide. Il a, de plus, constaté que, quelle que soit la longueur de l'aiguille, pourvu qu'elle soit plus longue que l'hélice, ses pôles sont toujours placés aux deux extrémités de la partie plongée, et que la portion qui se trouve hors de l'hélice n'est point aimantée. Du reste, l'intensité du magnétisme acquis par chaque aiguille se détermine par la durée de ses oscillations, qu'on peut apprécier à un ou deux centièmes de seconde près.

M. Abria a trouvé, en aimantant dans une même hélice des aiguilles de longueurs et de diamètres variables, que non-seulement l'intensité magnétique absolue, mais aussi la loi que suit la variation de cette intensité avec la variation de la force du courant, changent avec la longueur et le diamètre. Si l'on aimante dans une même hélice, par l'action d'un courant d'intensité graduellement croissante, des aiguilles semblablement trempées, l'intensité magnétique croît d'autant plus rapidement que la longueur de l'aiguille est plus considérable, le diamètre ne variant pas, ou que le diamètre est moindre, la longueur restant constante. De sorte que le diamètre ne variant pas, l'intensité magnétique croît pour une certaine longueur, comme l'intensité du courant, et pour une longueur plus grande, comme le carré de cette intensité; pour des longueurs intermédiaires, elle varie plus rapidement que suivant la première loi, et moins rapidement que suivant la seconde. La longueur pour laquelle l'aimantation développée croît suivant une même loi augmente en même temps que le diamètre.

Avec une hélice plus longue, la longueur pour laquelle l'intensité magnétique croît comme le carré de l'intensité du courant augmente très-rapidement avec le diamètre. Du reste, la longueur absolue de l'hélice n'influe pas sur l'intensité magnétique, tant que l'aiguille n'est pas plus longue que l'hélice. Le diamètre de l'hélice exerce une influence bien marquée en ce sens que, de deux hélices de même longueur, la plus étroite produit une aimantation plus forte; mais cela n'est vrai qu'autant que les hélices sont courtes, car si l'on augmente suffisamment la longueur de la moins étroite, la différence disparaît. Ainsi, une hélice de 34 millimètres de longueur et de 10 milli-

mètres de diamètre intérieur aimante aussi fortement des aiguilles de différents diamètres et de diverses longueurs, qu'une hélice de 17 millimètres de longueur et de 15 millimètres au plus de diamètre intérieur.

De deux hélices de même longueur, mais renfermant des nombres de tours différents, la plus énergique est celle qui a le plus de tours; lorsque l'intensité du courant est un peu forte, le degré de magnétisme communiqué aux aiguilles est à peu près proportionnel au nombre des tours de l'hélice; il n'en est plus de même pour des intensités plus faibles. Du reste, cette influence du nombre des tours de l'hélice varie aussi avec la longueur et le diamètre des aiguilles. Les enveloppes métalliques dont on entoure les aiguilles dans l'intérieur de l'hélice, et qui forment comme des étuis dans lesquels on les place, n'exercent aucune espèce d'influence sur le sens et l'intensité du magnétisme qui leur est communiqué; ce qui établit une différence remarquable entre l'aimantation par les courants et l'aimantation par les décharges électriques. Il va sans dire que les enveloppes métalliques dont il est question ne sont pas faites d'une substance magnétique, car alors l'influence ne serait pas nulle.

Une aiguille trempée, soumise d'une manière quelconque à l'action d'un courant, possède, après un intervalle de temps très-court, tout le magnétisme qu'elle peut acquérir. Si l'aiguille déjà aimantée est soumise à des courants agissant en sens inverse et graduellement croissants, l'intensité magnétique diminue, à mesure que l'énergie du courant contraire augmente; elle devient nulle pour une certaine intensité de celui-ci, moindre que l'intensité du courant qui a aimanté primitivement l'aiguille; au delà, l'aimantation inverse a lieu. Quand une aiguille a été désaimantée par l'action d'un courant inverse, elle ne se comporte pas comme auparavant; la nouvelle intensité magnétique qu'elle prend sous l'influence d'un courant donné est tantôt plus grande, tantôt plus petite que celle qu'elle avait prise primitivement. Il y a aussi changement dans la loi qui lie l'intensité du courant avec celle du magnétisme acquis.

Les irrégularités, les anomalies mêmes que présentent les phé-

nomènes successivement découverts par MM. Savary et Abria, tiennent, pour la plupart, comme nous l'avons déjà fait remarquer, au rôle important que jouent dans les actions magnétiques les forces moléculaires, qui jusqu'ici ont échappé elles-mêmes aux lois régulières auxquelles on a essayé de les soumettre.

§ 3. Aimantation du fer doux par les courants électriques.

Avant de pousser plus avant l'étude des phénomènes qui se rattachent à l'aimantation de l'acier, occupons-nous maintenant de celle du fer doux. Il y a des différences assez considérables dans les circonstances qui déterminent comme dans celles qui accompagnent cette aimantation, comparées aux circonstances semblables en ce qui concerne l'acier.

M. Arago avait observé le premier qu'un fil de métal traversé par un fort courant électrique et plongé dans de la limaille de fer en retient autour de lui une quantité considérable, qui forme une masse cylindrique de la grosseur d'un tuyau de plume. Au moment où le courant cesse de passer à travers le fil, cette masse tombe immédiatement. Ce phénomène prouve évidemment la susceptibilité des particules de fer d'acquérir un fort magnétisme sous l'influence d'un courant, et de le perdre dès que cette influence vient à cesser. Plus tard on essaya d'entourer un barreau de fer doux, courbé en forme de fer à cheval, d'un fil de cuivre recouvert de soie tourné en hélice, en ayant soin que l'hélice de la seconde branche fût la continuation de l'hélice de la première, de telle façon que si le barreau eût été redressé, les deux hélices n'en eussent fait qu'une toute *dextrorsum* ou toute *sinistrorsum*. Un faible courant électrique, tel que celui que produit un seul couple cuivre et zinc, suffit, en étant transmis à travers le fil, pour aimanter fortement le barreau. L'aimantation est instantanée; elle a lieu dès que le courant commence à passer, mais elle cesse presqu'entièrement avec lui. Elle est si énergique qu'on peut faire porter avec une pile

Fig. 124.

convenable jusqu'à 1,000 kilogrammes à un barreau de fer doux. On nomme ces aimants temporaires, *électro-aimants* (fig. 124), pour les distinguer des aimants permanents d'acier et des hélices électriques.

La découverte des électro-aimants a fait faire un pas très-grand au magnétisme, en fournissant un moyen de se procurer une puissance magnétique énorme, et on peut dire presque illimitée. Nous verrons dans les chapitres suivants, et surtout dans le sixième, le parti immense que la science en a tiré. Je me bornerai à citer ici les travaux de M. Delesse, savant français qui a appliqué d'une manière très-heureuse la puissance des électro-aimants à la détermination des propriétés magnétiques d'un très-grand nombre de roches, qui ne se seraient point manifestées sous l'action des aimants ordinaires, même les plus forts. On a également constaté que des électro-aimants peuvent agir sur des barreaux aimantés comme ils agiraient sur du fer doux non aimanté, c'est-à-dire leur imprimer un magnétisme passager contraire à celui qu'ils possédaient déjà, sans cependant détruire celui-là, qui reparaît après que l'action de l'électro-aimant a cessé.

Beaucoup d'expériences ont été faites pour déterminer les conditions les plus favorables au développement d'un fort magnétisme dans les électro-aimants. La longueur et le diamètre des branches du fer à cheval, le nombre des tours du fil conducteur, son diamètre, ont été successivement l'objet de nombreuses investigations. On a également varié la force et la nature de la pile destinée à produire le courant; on a cherché s'il valait mieux que le fil enroulé autour des deux branches de l'électro-aimant fût continu, de manière à être parcouru successivement par tout le courant, ou s'il était préférable qu'il fût divisé en un plus ou moins grand nombre de fils, entre lesquels le courant total se répartissait. MM. Moll, Henry, Liphaus et Quetelet, et bien d'autres encore, se sont occupés de ce sujet. Dernièrement MM. Jacobi et Lenz ont déterminé ce qu'ils appellent les lois des électro-aimants. Mais, en fait, on n'a pas obtenu jusqu'ici des résultats qu'on puisse regarder comme bien généraux. Cela tient à ce qu'il n'y a rien d'absolu dans ces lois.

Ainsi, avec un courant d'une certaine intensité ou développé par une certaine pile, tel système d'électro-aimant est préférable, tandis que pour un autre courant, d'intensité ou d'origine différente, tel autre système le sera. Je me bornerai donc à citer, pour le moment, quelques résultats qui paraissent bien prouvés, et que j'ai eu moi-même l'occasion, soit de vérifier, soit de déterminer.

La qualité du fer influe beaucoup sur la force de l'électro-aimant; il faut qu'il soit aussi doux que possible : cette qualité tient encore plus à la manière dont il est préparé qu'à son origine; il faut en général le recuire plusieurs fois de suite, en ayant soin de le laisser refroidir très-lentement. La rapidité avec laquelle le fer perd son aimantation, dès que le courant cesse, dépend essentiellement de sa nature; cependant il dépend aussi des dimensions du barreau. Les fers à cheval dont les branches sont longues perdent beaucoup moins facilement et moins vite leur magnétisme que ceux dont les branches sont courtes, de 10 centimètres, par exemple. La présence de l'armature aux extrémités des branches d'un électro-aimant contribue à lui conserver son magnétisme. M. Watkins a observé qu'un électro-aimant qui pouvait porter 120 livres pendant que le courant électrique l'aimantait, n'en ayant plus porté que 50 dès que le courant eut cessé de passer, continua à les supporter très-longtemps tant qu'on n'eut pas dérangé l'armature. Mais en arrachant violemment cette armature, tout le magnétisme disparut. On a reconnu également cette même propriété dans le fer doux aimanté par d'autres moyens que par le courant électrique. Cependant, si l'armature est enlevée immédiatement après que le fer doux a été saturé de magnétisme, ou après qu'elle est restée en place pendant plusieurs semaines, l'électro-aimant, malgré cette séparation, conserve encore quelques traces de magnétisme. Cette influence de l'armature semble tenir à un état d'équilibre qui s'établit entre toutes les parties de ce qu'on pourrait appeler un *circuit magnétique fermé,* c'est-à-dire d'un aimant en fer à cheval dont les deux extrémités sont réunies par une armature. Lorsque ce circuit est brusquement ouvert par l'arrachement de l'armature, l'équilibre qui s'était constitué

cesse pour faire place à un second équilibre, qui ramène à l'état naturel et de neutralisation ordinaire l'ensemble des forces magnétiques du fer doux. M. Alexandre a observé que si l'on chauffe fortement, avec des lampes à alcool, un électro-aimant, en même temps que le fil qui l'entoure est traversé par de forts courants électriques, on le rend, par cette double action combinée, capable en tout cas de perdre son magnétisme immédiatement, dès que le courant électrique cesse d'être transmis. Il faut évidemment, dans cette expérience, remplacer la soie dont on recouvre ordinairement le fil conducteur pour l'isoler, par de la gomme laque ou de la résine qui, sous l'action de la chaleur, forme une masse liquide capable de produire encore l'isolement nécessaire.

M. Moll avait observé le premier que, lorsqu'on renverse le sens du courant, celui du magnétisme, c'est-à-dire la place des pôles magnétiques, change immédiatement. Cependant le second magnétisme n'est jamais aussi fort que le premier, surtout si celui-ci a duré longtemps avant le changement opéré dans la direction du courant; toutefois un très-grand nombre de changements successifs finit par rendre un électro-aimant susceptible d'être magnétisé aussi facilement dans un sens que dans l'autre. Une aiguille d'acier fortement aimantée peut aussi, sous l'influence de forts courants, prendre des pôles opposés à ses pôles primitifs; il faut, pour cela, la placer de façon qu'elle ne puisse obéir à l'action directrice que ces courants tendraient à lui imprimer. On peut également aimanter des aiguilles et des barreaux d'acier avec avantage, en se servant de forts électro-aimants. Peu importe que leur magnétisme soit temporaire, pourvu qu'il dure le temps nécessaire pour l'aimantation. On a essayé également, avec quelque succès, d'appliquer contre les deux extrémités d'un électro-aimant celles d'un fer à cheval en acier qu'on avait chauffé jusqu'au rouge blanc, et de le laisser refroidir dans cette position. Après le refroidissement, il se trouvait avoir acquis un magnétisme puissant et permanent.

La facilité avec laquelle le fer doux acquiert et perd le magnétisme avec la cause qui le produit, celle avec laquelle il s'aimante alternativement dans un sens ou dans l'autre, ont donné

naissance à plusieurs appareils, et même à des applications telles que celles du télégraphe électrique, et bien d'autres encore, dont nous nous occuperons dans la sixième partie de cet ouvrage. Nous nous bornerons, pour le moment, à décrire trois appareils qui mettent en évidence cette double propriété de la manière la plus élégante.

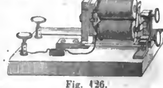
Dans le premier appareil, dont le principe a été imaginé par M. Ritchie, on dispose verticalement, sur un support horizontal, quatre aimants cylindriques d'égale longueur, de manière qu'ils soient placés aux quatre angles d'un carré, et que leurs surfaces supérieures soient exactement sur un même plan horizontal (fig. 125). On a soin de les tourner de façon que chacun des quatre ait alternativement en haut son pôle nord et son pôle sud. Deux petits électro-aimants, placés en croix et mobiles dans un plan horizontal, autour d'un axe vertical passant par leur point de croisement, sont arrangés de façon que, lorsque l'une des quatre extrémités de leurs deux branches est en face de l'un des pôles magnétiques, les trois autres soient aussi respectivement en face des trois autres pôles magnétiques. Chaque électro-aimant est entouré d'un fil de métal recouvert de soie, et qui est destiné à transmettre le courant nécessaire à l'aimantation. Les deux extrémités de chacun de ces deux fils plongent, mais de manière à l'effleurer seulement, dans le mercure de deux petits canaux annulaires concentriques, qui tous les deux sont creusés dans une pièce fixée au haut de l'appareil et en dedans des aimants. Chacun de ces canaux est divisé en quatre compartiments, et les petites cloisons transversales qui les séparent sont situées dans les parties des deux canaux qui correspondent exactement à la place de chaque aimant. L'un des pôles de la pile communique avec les deux compartiments opposés du canal intérieur et avec les deux autres du canal extérieur; l'autre pôle communique avec les quatre autres compartiments; les extrémités du même fil plongent toujours, l'une dans l'un des compartiments du canal extérieur, et l'autre dans le compartiment correspondant du canal intérieur; mais l'arrange-

Fig. 125.

ment est tel que si les extrémités d'un des fils sont dans certains compartiments, celles de l'autre sont dans les compartiments qui suivent ou qui précèdent immédiatement celui-là. Il en résulte que les courants traversent les fils des deux électro-aimants en sens opposés, par conséquent que les extrémités de ces électro-aimants sont attirées par les pôles contraires des aimants fixes. Mais quand ils sont arrivés devant ces aimants, les bouts des fils passent chacun d'un compartiment dans le suivant; il en résulte un changement dans la direction du courant de chacun des deux fils, et par conséquent un changement dans le sens de l'aimantation de chaque électro-aimant. Aussitôt les quatre pôles des électro-aimants sont repoussés par les quatre pôles des aimants devant lesquels ils ont été respectivement amenés; ils sont, par conséquent, attirés par les pôles contraires des aimants suivants. Arrivés devant eux, le même changement de compartiments s'opère pour les bouts des fils, la même inversion, par conséquent, dans le sens des courants a lieu, et la même répulsion que précédemment se manifeste immédiatement, et ainsi de suite; d'où résulte un mouvement continu de rotation qui peut devenir d'une rapidité inouïe, ce qui prouve avec quelle promptitude le changement de sens dans l'aimantation peut s'opérer dans le fer doux. On voit que, si les extrémités des fils peuvent passer d'un compartiment à l'autre sans être arrêtées par les cloisons qui les séparent, et tout en continuant à plonger dans le mercure, cela tient à ce que celui-ci, en vertu de sa capillarité, s'élève un peu au-dessus des parois qui forment les canaux, et par conséquent des cloisons qui les séparent en plusieurs cases, et qui sont de la même hauteur que ces parois. Il arrive seulement quelquefois que le mercure entraîné par les pointes recouvre la cloison, et établit ainsi une communication entre deux compartiments consécutifs, ce qu'il faut éviter, car le mouvement cesse aussitôt, puisque le courant ne traverse plus les fils des électro-aimants mobiles, les deux pôles de la pile étant mis en communication directe par le mercure.

Le second appareil, qui montre avec quelle rapidité le fer doux peut acquérir et perdre son aimantation, a été imaginé et construit par M. Froment, habile artiste de Paris. Il consiste

(fig. 126) en un petit électro-aimant dont l'armature, qui se compose d'une plaque de fer très-légère, peut osciller entre les pôles d'une part, et un arrêt d'autre part contre lequel un ressort tend à la faire appuyer. Un courant électrique introduit dans l'appareil passe par la plaque de fer et son arrêt, de telle façon que le circuit soit interrompu dès que ces deux pièces se séparent. Cet effet se produit de lui-même en interposant dans le circuit le fil qui entoure l'électro-aimant, car celui-ci attire alors la plaque de fer doux qui, en se séparant de son arrêt, interrompt le passage du courant; aussitôt l'aimantation cesse, la lame de fer, poussée par le ressort, retourne frapper l'arrêt et fermer de nouveau le circuit; nouvelle aimantation, nouvelle interruption du circuit et ainsi de suite, avec une rapidité qu'on est maître de régler et qui peut atteindre plusieurs milliers de battements par seconde. En tournant les vis qui servent à faire varier l'amplitude de la vibration et la force du ressort, on fait rendre à l'instrument tous les sons de l'échelle musicale, ce qui permet d'en déduire le nombre de vibrations. Cet instrument, qui montre que dans une seconde le fer d'un électro-aimant peut être plusieurs milliers de fois aimanté et désaimanté, présente des applications dont nous nous occuperons quand nous traiterons des courants d'induction. Nous nous bornerons à en signaler une pour le moment; elle consiste en ce que l'instrument étant réglé de manière à rendre un son fixe, les moindres variations dans l'intensité du courant employé sont accusées à l'oreille par un changement dans le ton du son, qui provient d'un changement dans le nombre des vibrations correspondantes.


Fig. 126.

Enfin, un troisième appareil, construit par M. Watkins (fig. 127), consiste dans un balancier semblable, sauf qu'il est beaucoup plus considérable, à celui d'une montre et lié également à un ressort spiral. Ce balancier est muni d'une petite pièce de fer doux qui est placée très-près des pôles d'un électro-aimant, de telle façon que, lorsqu'un courant

électrique traverse le fil de l'électro-aimant, elle est attirée par lui, vient adhérer à ses pôles en entraînant le balancier. Mais un petit disque d'ivoire, dans lequel est incrustée une lame métallique, est fixée au balancier et se meut avec lui. Un ressort métallique, appuyé contre la circonférence du disque, se trouve ainsi tantôt en contact avec le métal, tantôt avec l'ivoire du disque. Dans le premier cas, qui a lieu quand la pièce de fer doux est éloignée des pôles de l'électro-aimant, le courant est transmis et la pièce est attirée; dans le second cas, qui a lieu quand la pièce est en contact avec les pôles, le courant n'est plus transmis, l'électro-aimant n'est plus aimanté, et la pièce de fer doux n'étant plus retenue près des pôles, le ressort spiral qui avait été tendu se détend et fait revenir le balancier en arrière. Celui-ci exécute ainsi dans un temps donné un nombre de vibrations plus ou moins considérable; ce nombre dépend de l'intensité du courant transmis et peut ainsi lui servir de mesure.



Fgi. 127.

Pour bien étudier dans ses détails l'aimantation opérée par les courants électriques, il faut avoir une ou deux bobines en bois entourées chacune de plusieurs circonvolutions d'un fil de cuivre recouvert de soie, à travers lequel on transmet le courant (fig. 128). Il est bon que ce fil de cuivre, qui forme ainsi des



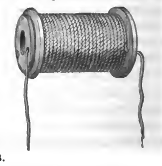


Fig. 128.

hélices superposées, ait un diamètre de deux à cinq millimètres, afin qu'on puisse y faire passer un courant énergique sans qu'il s'échauffe sensiblement. Si l'on présente à l'ouverture d'une bobine semblable, dont le fil est dans le circuit voltaïque, une

tige de fer doux et même une tige d'acier, on sent qu'elle est attirée, et elle se précipite dans la bobine jusqu'à ce qu'elle se soit placée de façon que son milieu coïncide avec celui de l'hélice enveloppante; résultat qu'on obtient également, que la tige soit plus courte ou plus longue que l'axe de la bobine ou qu'elle lui soit égale. Des balles de fer doux d'un diamètre quelconque, placées à l'ouverture de la bobine et pouvant rouler sur un plan intérieur bien horizontal, se précipitent également en dedans et s'arrêtent au milieu; il en est encore de même pour des disques et des anneaux de fer doux, seulement, lors même qu'on les présente à l'ouverture de la bobine de manière que leur plan soit perpendiculaire à l'axe de l'hélice, ils se tournent immédiatement et se placent au milieu, de façon que leur plan ou leur diamètre soit parallèle à l'axe. Ce fait, et un grand nombre d'autres semblables, montrent de la manière la plus évidente la disposition que possèdent les corps magnétiques à s'aimanter toujours dans le sens de leur plus grande longueur, de manière que les pôles opposés soient aussi éloignés que possible l'un de l'autre. On en a une nouvelle preuve en faisant l'expérience avec une bobine dont l'ouverture a un grand diamètre de 12 à 15 centimètres, par exemple (fig. 129),

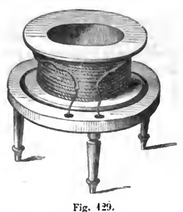


Fig. 129.

et en observant en particulier l'arrangement que prend la limaille de fer placée dans l'intérieur de cette bobine. Il faut,

pour que cette observation se fasse bien, que l'axe de la bobine soit vertical; on introduit alors dans l'ouverture un disque de bois ou de carton muni d'un rebord, et dans lequel on a mis de la limaille de fer. A l'ouverture comme au fond de la bobine, la limaille forme une multitude de petits tas qui se portent tous vers le centre, c'est-à-dire vers le point où l'axe coupe le plan qui les porte; mais à mesure qu'on s'approche du milieu de la bobine, on voit les petits tas qui, séparés les uns des autres, ont jusqu'à 2 ou 3 centimètres de hauteur, fuir le centre et s'approcher tous des bords, c'est-à-dire de la paroi extérieure de la bobine. Il semble que chacun de ces tas forme autant de petits aimants qui se repoussent mutuellement par l'effet de l'action répulsive de leurs pôles homonymes, comme ce serait le cas pour les aiguilles aimantées d'un faisceau magnétique, si elles étaient mobiles. Si au lieu de limaille on place dans la bobine des bouts de fil de fer plus courts que son diamètre intérieur, on les voit, dès qu'un courant traverse le fil de cuivre roulé en hélice, quitter leur position horizontale pour en prendre une verticale, en s'éloignant tous les uns des autres, et demeurer même suspendus dans cette position, quand on enlève par dessous le support sur lequel ils avaient été primitivement placés.

Un cylindre de fer doux, placé dans l'intérieur de la bobine et plus long qu'elle, s'aimante, quelle que soit sa longueur, de façon toujours que ses pôles se trouvent aux points qui sont immédiatement au dehors de la bobine; c'est ce dont on peut juger par la disposition qu'affecte la limaille de fer. La partie aimantée s'étend assez loin au dehors de la bobine, et si les deux portions qui ressortent du cylindre sont d'inégale longueur, la plus longue est la plus fortement aimantée. Quand on introduit un cylindre creux de fer dans l'intérieur de la bobine, de manière que l'une de ses extrémités ou toutes les deux dépassent d'un ou deux centimètres au moins l'ouverture de la bobine, on trouve qu'il s'aimante extérieurement comme un cylindre plein; mais il ne manifeste intérieurement aucune espèce de trace de magnétisme; seulement si l'on met à un centimètre environ de l'une ou de l'autre de ses extrémités une

petite balle de fer, on la voit se porter avec rapidité vers l'ouverture, et là, en faisant le tour du bord, glisser sur la surface extérieure à laquelle, elle reste adhérente malgré son poids, jusqu'à une distance de 8 à 12 millimètres du bord. De la limaille de fer introduite dans l'intérieur, mais près du bord, éprouve le même effet d'une manière également instantanée. Dans ces expériences, la bobine doit être placée de manière que son axe soit parfaitement horizontal.

Non-seulement le cylindre de fer doux ne présente aucune trace de magnétisme intérieurement, sauf près des bords, mais il interrompt toute l'action magnétique de l'hélice sur du fer qu'on y introduit. Il n'en est pas de même si ce cylindre est fendu horizontalement, pourvu que cette fente aille d'un bout à l'autre, ou s'il est formé simplement d'une feuille de tôle dont les bords sont rapprochés et rivés, mais sans soudure. Dans ce cas, les effets magnétiques intérieurs de l'hélice se manifestent commme à l'ordinaire ; il en est de même quand on introduit dans l'hélice un cylindre creux de cuivre ou d'un métal quelconque non magnétique, lors même que ces derniers cylindres ont leur surface parfaitement continue. Ces observations s'appliquent, non-seulement aux effets magnétiques de l'hélice dont nous avons déjà parlé, mais également à ceux dont nous allons nous occuper. M. de Haldat a constaté, au moyen d'observations nombreuses et faites avec beaucoup de soin, qu'un cylindre creux de fer doux, quelque mince que soit son enveloppe, prend sous l'influence du courant d'une hélice tout autant de force magnétique qu'un cylindre semblable, mais plein ; ce qu'il regarde comme une preuve de plus à ajouter à celles qu'il a déjà données, que le magnétisme réside tout entier à la surface, et que la masse n'exerce presque point d'influence sur les propriétés magnétiques d'un corps. Cette opinion de M. de Haldat trouve sa confirmation dans les essais faits par quelques physiciens d'électro-aimants dans lesquels on remplace le cylindre de fer doux par un faisceau de fils de fer, combinaison qui donne dans quelques cas une puissance magnétique beaucoup plus considérable, comme nous aurons occasion de le remarquer plus loin.

Un physicien français, M. Nicklès, vient par des recherches intéressantes d'éclaircir un point contesté entre les savants allemands, relativement à l'influence de la longueur des tranches des électro-aimants sur leur puissance magnétique. MM. Lenz et Jacoby, appuyés par M. Muller, soutiennent que, à égalité de conditions, la longueur des branches d'un électro-aimant est sans influence sur les poids portés; M. Dub, au contraire, prétend que l'attraction d'un électro-aimant grandit avec la longueur des barreaux. M. Nicklès a constaté que la proposition de MM. Lenz et Jacoby n'est vraie qu'autant qu'elle concerne les fers à cheval ordinaires, c'est-à-dire munis de deux hélices en sens contraire. Si les deux hélices sont de même sens et si le fer à cheval n'est muni que d'une hélice, et enfin si le barreau de fer est rectiligne à non en fer à cheval, c'est la proposition de M. Dub qui se vérifie. Cette influence de la longueur tient, suivant M. Nicklès, à ce qu'en allongeant un barreau aimanté on écarte les pôles de noms contraires, et on diminue d'autant les effets de neutralisation que ces pôles peuvent exercer entre eux. M. Nicklès est arrivé à cette conclusion en prenant un barreau de fer entouré d'une hélice de fil de cuivre qu'il met dans le circuit, puis il choisit pour armature une pièce de fer dont la masse et la longueur, variables suivant le courant, sont prises de manière que cette armature puisse être attirée sans rester suspendue. A ce moment, il pose sur le pôle supérieur de l'électro-aimant un cylindre de fer, immédiatement l'armature se suspend à l'aimant, y adhère plus ou moins énergiquement, pour retomber dès qu'on retire le cylindre qui est placé sur l'autre pôle. Voici le tableau de quelques résultats obtenus avec un certain nombre de cylindres de même section et de longueurs progressivement croissantes; le n° 1 avait $0^m,050$ de longueur, le n° 2 en avait $0^m,100$, le n° 3 $0^m,110$, etc. L'hélice se composait de 94 mètres de fil de 1 millimètre de diamètre, formant 754 tours de spires; le cylindre placé sur la bobine était semblable au n° 3. L'armature était au bout du cylindre du poids de 74 grammes; sa surface de contact avait été rendue convexe. Deux courants de force différente ont été successivement employés.

COURANT D'UNE FORCE DE TANG. 11°,20'.			COURANT D'UNE FORCE DE TANG. 7°,15'.		
CYLINDRE superposé.	PORTE D'EMBLÉE	TOMBE AVEC	CYLINDRE superposé.	PORTE D'EMBLÉE	TOMBE AVEC
0	1700 gr.	1750 gr.	0	980 gr.	1000 gr.
Nº 1	1900	2000	Nº 1	1100	1150
2	2000	2150	2	1210	1250
3	2150	2240	3	1260	1300

Cette influence de l'allongement du barreau aimanté sur l'attraction magnétique, qui est très-manifeste, a néanmoins une limite, à partir de laquelle l'attraction diminue à mesure que la longueur augmente. M. Nicklès a aussi varié ses essais en employant des électro-aimants en fer à cheval avec une troisième branche latérale parallèle aux deux autres; les résultats un peu compliqués qu'il obtint sont conformes du reste aux principes que nous venons d'exposer. Nous y reviendrons dans la sixième partie, consacrée aux applications.

§ 3. Mouvements vibratoires et effets moléculaires que détermine dans les corps magnétiques l'action des courants électriques.

M. Page, physicien américain, avait observé en 1837 que, en approchant le pôle d'un fort aimant d'une spirale plate traversée par un courant électrique, on produit un son. M. Delezenne, en France, avait réussi également en 1838 à produire un son en faisant tourner rapidement un armature de fer doux devant les pôles d'un aimant en fer à cheval. En 1843, j'avais moi-même remarqué que des lames ou des tiges de fer rendent un son très-prononcé quand on les place dans l'intérieur d'une hélice dont le fil est traversé par un fort courant électrique, mais seulement au moment où le circuit est fermé et au moment où il est interrompu. M. Gassiot à Londres, et M. Marrian à Birmingham, avaient fait également une expérience analo-

gue en 1844. Attribuant ce phénomène singulier à un changement que le magnétisme déterminerait dans la constitution moléculaire du corps aimanté, je fis un assez grand nombre d'expériences pour étudier ce sujet intéressant.

Avant tout, il est important, pour obtenir une série nombreuse de vibrations, d'avoir un moyen d'interrompre et de rétablir plusieurs fois, dans un temps très-court, le circuit dont fait partie le fil qui transmet le courant; de rendre, en d'autres termes, *discontinu* un courant *continu*. Je me servis dans ce but d'un de ces nombreux appareils nommés *rhéotomes* ou *coupe-courants*, et qui sont destinés, quand on les met dans le circuit, à rendre un courant discontinu. L'un des plus commodes (fig. 130) consiste dans une tige horizontale qui porte deux aiguilles en laiton implantées perpendiculairement et parallèlement entre elles, disposées de telle façon que quand elles plongent simultanément dans deux capsules remplies de mercure et isolées l'une de l'autre, le circuit est fermé, et que quand elles n'y plongent pas, il est ouvert. Un mouvement d'horlogerie ou simplement une manivelle mue par la main imprime à l'axe un mouvement de rotation d'où résulte que, dans un temps donné, une seconde, par exemple, le circuit peut être fermé et interrompu un grand nombre de fois. L'appareil de la figure 130 présente quatre aiguilles au lieu de deux, et par consé-

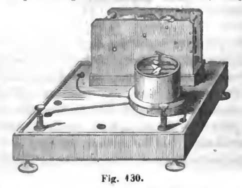
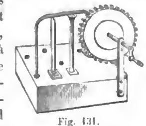


Fig. 130.

quent quatre compartiments correspondants aux quatre aiguilles. Nous aurons occasion de voir plus tard à quoi sert le second système des deux aiguilles; pour le moment, un seul nous

suffit, et par conséquent dans toutes les expériences qui vont suivre, on se servira indifféremment, pour le mettre dans le circuit, de celui qui est le plus rapproché du mouvement d'horlogerie ou de celui qui en est le plus éloigné. Le mercure risque d'être projeté lorsque le mouvement est trop rapide; il faut, pour prévenir cet inconvénient, recouvrir les capsules, les aiguilles et l'axe qui les porte d'un petit couvercle en verre. Lorsque le courant est très-fort, le mercure s'oxyde par l'effet des étincelles qui ont lieu au moment où les aiguilles en sortent; il est nécessaire dans ce cas d'enlever cet oxyde ou de changer le mercure. On peut se passer de mercure et le remplacer par deux lames métalliques élastiques qui s'appuient sur un cylindre ou sur la circonférence d'une roue en bois verni ou en ivoire, dans les contours desquelles sont incrustées de petites pièces métalliques qui communiquent ensemble Quand les lames élastiques, par l'effet de la rotation du cylindre ou de la roue sur son axe, viennent en contact avec la partie métallique de la surface, le circuit est fermé; quand le contact avec cette partie métallique vient à cesser, que c'est avec le bois ou l'ivoire qu'il a lieu, le circuit est ouvert. Il faut que les deux lames soient ici, comme l'étaient les cases remplies de mercure dans le cas précédent, sur la route du courant qui doit traverser le fil de l'hélice, et qu'elles appuient fortement contre la surface du contour. On peut encore interposer simplement, dans le trajet d'un courant, une roue dentée et une lame métallique élastique qui s'appuie sur les dents de la roue (fig. 131). En imprimant à la roue un mouvement sur son axe, on fait sauter la lame d'une dent à une autre; chaque saut détermine une rupture du circuit, qui immédiatement après se trouve de nouveau fermé. Le ton musical que rend la lame donne exactement, lorsqu'on n'a pas d'autre moyen de le mesurer, le nombre de fois que dans une seconde le circuit a été ouvert et fermé, c'est-à-dire interrompu. Je me suis étendu sur ces diverses espèces


Fig. 131.

de *rhéotomes*, parce que nous ferons souvent usage des uns et des autres. Pour le moment, nous allons les appliquer à l'étude des mouvements vibratoires qu'éprouvent les corps magnétiques sous l'influence des courants discontinus.

Quand on place un corps magnétique, mais non aimanté, tel que le fer, l'acier, dans l'intérieur d'une bobine, ce corps éprouve des mouvements vibratoires très-remarquables dès qu'on fait passer à travers le fil qui entoure la bobine une série de courants discontinus. Ces mouvements se manifestent sous la forme de sons très-prononcés, et variés quand le corps a une forme cylindrique ou même allongée. Le son est moins prononcé, mais plus aigu et plus *métallique*, avec de l'acier qu'il ne l'est avec du fer doux. Quelle que soit la forme ou la grandeur des morceaux de fer doux, on distingue toujours deux sons : l'un est une suite de coups ou de chocs plus ou moins secs assez analogues au bruit que fait la pluie en tombant sur un toit de métal; ces coups correspondent exactement aux alternatives de passage et d'interruption dans le courant; l'autre son est un son musical qui correspond à ceux que donnerait la masse de fer par l'effet de vibrations transversales. Il faut avoir soin de distinguer dans ces sons ceux qui sont dus à la simple action mécanique du courant sur le fer, action qui, s'exerçant sur l'ensemble de la masse, peut la déformer et produire par conséquent par sa discontinuité même une suite de vibrations. Cependant elle ne suffit pas pour expliquer tous les sons, et il faut admettre qu'il y a en outre une action moléculaire, c'est-à-dire que l'aimantation déterminant un arrangement particulier des molécules du fer, une succession rapide d'aimantations et de désaimantations donne naissance à une série de vibrations. Comment expliquer autrement, par exemple, le son musical très-clair et très-brillant que rend une masse de fer cylindrique de 10 centimètres de diamètre et du poids de 10 kilogrammes, quand elle est placée dans l'intérieur de la grosse hélice (fig. 129), traversée par un courant discontinu? Des tiges de fer de un à plusieurs centimètres de diamètre fixées par leurs deux extrémités rendent aussi, sous la même influence, des sons très-prononcés. Mais le son le plus brillant est celui qu'on ob-

tient en tendant sur une table d'harmonie des fils de 1 à 2 millimètres de diamètre, bien recuits et longs de 1 à 2 mètres. Ils sont placés dans l'axe d'une ou plusieurs bobines, dont les fils sont traversés par les courants électriques, et ils produisent un ensemble de sons dont l'effet est surprenant et ressemble beaucoup à celui auquel donnent naissance plusieurs cloches d'église vibrant harmoniquement dans le lointain. Il est nécessaire, pour obtenir cet effet, que la succession des courants ne soit pas trop rapide et que les fils ne soient pas trop tendus. Avec un fil de $1^{m},576$ de longueur et 1 millimètre 8 de diamètre, j'ai trouvé que le maximum d'effet a lieu quand il est tendu par un poids de 26 à 53 kilogrammes s'il est *recuit*, et de 29 à 57 s'il est *écroui*. A partir de la limite, à mesure que la tension augmente, l'intensité totale et le nombre des sons différents diminuent notablement; et à un certain degré de tension, on n'entend plus aucun des sons dus aux vibrations transversales, mais seulement celui qui provient des vibrations longitudinales. L'inverse a lieu quand on détend le fil.

On peut produire des sons tout à fait analogues à ceux que nous venons de décrire, en faisant passer le courant électrique discontinu à travers le fil de fer lui-même. On remarque également une série de coups secs correspondant aux interruptions du courant, et des sons musicaux plus forts et plus sonores dans quelques cas, que ceux qu'on obtient par l'aimantation du même fil. Cette supériorité d'effet se manifeste surtout quand le fil est très-recuit et d'un diamètre d'environ 2 millimètres; pour des diamètres plus considérables ou moindres, l'aimantation par l'hélice produit des effets plus intenses que ceux qui résultent de la transmission du courant. Du reste, les mêmes circonstances qui influent sur la nature et la force du son dans le premier cas exercent une influence semblable dans le second cas. La transmission du courant discontinu ne produit des sons que si elle a lieu à travers le fer, l'acier, l'argentane, et en général les corps magnétiques, mais à des degrés différents chez chacun, degrés dépendant de la force coercitive qui contrarie le phénomène. Des fils de cuivre, de platine, d'argent, et en général de métaux quelconques, hormis les magnétiques, ne dé-

gagent aucun son, pas plus sous l'influence de courants transmis que sous celle de courants ambiants, tels que les courants qui parcourent les tours d'un fil enroulé en hélice autour d'une bobine.

Le son qu'on produit quand on fait passer à travers un fil de fer un courant électrique discontinu explique un fait observé depuis longtemps, et décrit déjà en 1785 par un chanoine, Gottoin de Côme, voisin et contemporain de Volta. Ce fait est qu'un fil de fer tendu en plein air, d'une longueur au moins de 10 mètres, rend spontanément un son sous l'empire de certaines variations de l'état de l'atmosphère. Les circonstances qui accompagnent comme celles qui favorisent la production du phénomène démontrent que c'est à la transmission de l'électricité atmosphérique qu'il faut l'attribuer. Cette transmission en effet n'a point lieu d'une manière continue, comme celle d'un courant, mais bien par une suite de décharges. Or, M. Beatson a démontré qu'une décharge d'une bouteille de Leyde à travers un fil de fer fait rendre un son à ce fil, pourvu qu'elle n'ait pas lieu trop brusquement, mais qu'elle soit un peu ralentie par son passage à travers un conducteur humide, tel qu'une ficelle mouillée.

Les sons que rendent, dans les circonstances que nous venons de décrire, le fer et les corps magnétiques semblent indiquer d'une manière évidente que l'aimantation opérée par l'influence d'un courant extérieur, aussi bien que la transmission directe d'un courant, déterminent chez eux une modification dans l'arrangement de leurs particules, c'est-à-dire dans leur constitution moléculaire. Cette modification cesse et se reproduit constamment par l'effet de la discontinuité du courant, d'où résulte la production d'une série de vibrations et par conséquent divers sons.

Un grand nombre d'observations faites par différents physiciens ont démontré en effet, d'une manière directe, l'influence de l'aimantation sur les propriétés moléculaires des corps magnétiques. M. de Wertheim, dans un grand travail sur l'élasticité des métaux, avait déjà observé que l'aimantation opérée au moyen d'une hélice dont le fil est traversé par le courant électrique produit une diminution du coefficient d'élasticité dans

le fer doux et même dans l'acier; diminution qui, dans le dernier du moins, persiste en partie, même après l'interruption du courant. M. Guillemin a également remarqué plus tard qu'une barre de fer doux, fixée par une de ses extrémités tandis que l'autre est libre, et qui, au lieu de demeurer horizontale, se courbe par l'effet de son propre poids ou par celui d'un petit poids additionnel, se redresse immédiatement au moment où l'on fait passer un courant dans le fil d'une hélice dont elle est enveloppée, hélice qui, elle-même, se redresse avec la barre dont elle suit tous les mouvements, puisqu'elle est enroulée autour d'elle. Cette expérience a ceci d'important, qu'elle montre que l'aimantation détermine une modification dans l'état moléculaire du fer, car elle ne peut s'expliquer par une action mécanique qui ne pourrait avoir lieu qu'autant que l'hélice serait indépendante de la barre.

Il y a plus : un physicien anglais, M. Joule, est parvenu à déterminer l'influence que l'aimantation peut exercer sur les dimensions des corps. Il s'est assuré d'abord, en plaçant une barre de fer doux dans un tube bien fermé, rempli d'eau et surmonté d'un tube capillaire, que cette barre n'éprouvait aucune variation de volume, quand on l'aimantait au moyen d'un fort courant électrique qui parcourait tous les tours d'une hélice enveloppante. En effet, la moindre variation de volume aurait été accusée par un changement de niveau de l'eau dans le tube capillaire; or on n'en observe aucun, quelle que soit la force de l'aimantation. Ce résultat est d'accord avec celui que M. Gay-Lussac avait trouvé autrefois, et avec celui qu'a également obtenu M. Wertheim, en opérant à peu près comme M. Joule. Mais si le volume total n'est point altéré, il n'en est point de même des dimensions relatives de la barre, qui, sous l'influence de l'aimantation, éprouve une augmentation de longueur en même temps qu'une diminution de diamètre, du moins entre certaines limites. C'est au moyen d'un appareil très-délicat, semblable au comparateur qui sert à mesurer la dilation des métaux, que M. Joule a trouvé qu'une barre de fer doux éprouve un allongement prononcé, qui est environ $\frac{1}{720000}$ de sa longueur totale, au moment où l'on établit le courant qui l'aimante, et un

racourcissement au moment où on l'interrompt. Le raccourcissement est moindre que l'allongement, ce qui tient à ce que la barre conserve toujours un certain degré de magnétisme. Il paraîtrait que l'allongement est *proportionnel, dans une barre donnée, au carré de l'intensité du magnétisme qui y est développé.* Quand au lieu de barres on fait usage de fils de fer, il peut arriver que ce soit un raccourcissement et non plus un allongement qu'on obtienne au moment de l'aimantation; ce changement dans la nature de l'effet s'observe quand le degré de tension auquel le fil est soumis dépasse une certaine limite. Ainsi un fil de fer de 32 centimètres de longueur sur 5 millimètres de diamètre s'allonge bien sous l'influence du magnétisme, tant qu'il n'est pas exposé à une tension supérieure à 350 kilos, mais d'autant moins cependant qu'on s'approche davantage de cette tension. A partir de cette limite et pour des tensions croissantes qui, dans une expérience, furent poussées jusqu'à 800 kilog., on vit constamment le fil se raccourcir au moment où il était aimanté. La tension n'exerce pas d'influence sur de l'acier fortement trempé; aussi il n'y a jamais d'allongement, mais seulement un raccourcissement qui commence lorsque la force du courant surpasse celle qui est nécessaire pour aimanter le barreau à saturation.

M. Wertheim, de son côté, à la suite de recherches longues et minutieuses, est parvenu à analyser les effets mécaniques qui se manifestent dans l'aimantation. Il a trouvé que, lorsqu'une barre de fer est encastrée par une de ses extrémités, et que la bobine est placée de manière que son axe coïncide avec celui de la barre, on n'observe pas de mouvement latéral, mais seulement un très-petit alongement qui dépasse rarement 0,002 millimètres. Cet alongement est d'autant plus fort que la bobine se trouve plus près de l'extrémité libre de la barre, et diminue à mesure qu'on la rapproche du point d'encastrement. Lorsque la barre n'est plus dans l'axe de la bobine, l'alongement subsiste toujours, mais il est accompagné d'un mouvement latéral dans le sens du rayon de la bobine. La bobine dont faisait usage M. Wertheim avait 25 centimètres de longueur et 18 millimètres de diamètre intérieur; des lunettes d'un gros-

sissement d'environ 20 diamètres, et renfermant deux fils en acier, servaient à mesurer l'allongement et le déplacement latéral. Ce déplacement, ou, ce qui revient au même, la flèche de courbure de la barre mesurée à son extrémité a été déterminée pour différentes intensités du courant, et il a paru qu'elle était en général proportionnelle à cette intensité; mais elle varie pour chaque position de la barre dans l'intérieur de la bobine. Quoi qu'il en soit, on peut trouver pour chacune de ces positions l'équivalent mécanique de l'unité d'intensité du courant, c'est-à-dire le poids qui, appliqué à l'extrémité de la barre, produirait la même flèche. Ainsi, par exemple, en appelant D la longueur de la partie du rayon comprise entre l'axe de la barre et l'axe de la bobine, f la flèche de courbure, et P le poids qui produirait la même flèche, on a obtenu les résultats suivants, en agissant successivement sur les trois barres de fer dont les masses respectives étaient 100^{k}; 40, 50; et 25, 00.

N° DE LA BARRE.	Pour D = 80.		Pour D = 50.	
	f	P	f	P
1	0^{m},1337	6^{gr},408	0^{m},0727	3^{gr},484
2	0 ,9337	2 ,673	0 ,4747	1 ,493
3	0 ,4648	1 ,462	0 ,2853	0 ,813

On calcule P d'après la formule $P = \frac{fqbc^3}{4L^3}$ dans laquelle f est la flèche de courbure, q le coefficient d'électricité qui est de 19,000 kilogrammes par millimètre carré pour le fer doux, b et c la largeur et l'épaisseur de la barre, et L sa longueur depuis le point d'encastrement jusqu'à son extrémité libre. On déduit du tableau qui précède la valeur des forces mécaniques qui sont entre elles pour D = 80, comme 100 : 41, 71 : 22, 81; et pour D = 50, comme 100 : 40, 50 : 23, 34. De sorte qu'on peut en conclure, puisque les masses des trois barres sont entre elles comme 100 : 40, 50 : 25, 50, que l'effet, qui est ici une attraction, est proportionnel à la masse du fer sur lequel le

courant agit. On trouve également qu'il est proportionnel à l'intensité du courant, ce qui rendrait facile de construire, d'après ce principe, un galvanomètre assez sensible, en se servant d'une bobine prismatique et d'une bande de fer large et mince.

Ainsi toutes les expériences que nous venons de rapporter conduisent à reconnaître qu'il se produit par l'effet de l'aimantation une traction mécanique due à une composante longitudinale et à une composante transversale, que celle-ci devient nulle lorsque la barre se trouve au centre de l'hélice, que l'une et l'autre sont proportionnelles à l'intensité du courant et à la masse du fer.

Il est plus difficile de constater l'effet du courant transmis que celui du courant extérieur qui produit l'aimantation. En effet, dans le premier cas l'effet mécanique du courant est très-difficile à séparer de son effet calorifique. Cependant il résulte, de quelques expériences de M. Beatson, qu'un fil de fer semble éprouver à l'instant où il est mis dans le circuit une petite expansion subite, et très-distincte de la dilatation qui résulte pour lui comme pour les autres métaux du réchauffement produit par le passage du courant.

Ces effets mécaniques une fois bien étudiés, nous pouvons revenir avec plus de connaissance de cause à l'étude même des sons qui accompagnent, soit l'aimantation, soit la transmission des courants.

M. Wertheim a constaté, d'une manière parfaitement précise, l'existence d'un son longitudinal dans une barre de fer ou d'acier placée au centre d'hélices traversées par des courants discontinus; ce son, semblable à celui que produit le frottement, est dû, ainsi que l'expérience directe le prouve, à des vibrations qui se font réellement dans le sens de l'axe. Avec des fils substitués aux barres, les effets sont les mêmes, sauf que, lorsque la tension diminue, on entend, outre le son longitudinal, un bruit de ferraille tout particulier qui semble courir le long du fil, ainsi que d'autres bruits particuliers. Avec les courants transmis, on entend également le son longitudinal, et il demeure le même, à l'intensité près, que le courant traverse seulement une partie de la barre, ou qu'il la traverse tout entière,

preuve de l'analogie qui existe entre l'action du courant transmis et celle d'une autre force mécanique telle que le frottement; preuve également que le son n'est pas dû à des vibrations d'une espèce particulière engendrées par le courant. Le son longitudinal a lieu aussi dans des barres et dans des fils; mais quand on opère avec les fils, s'ils ne sont pas bien tendus, le son longitudinal est accompagné des divers bruits dont nous avons parlé. Au reste, soit avec des barres, soit avec des fils, on entend chaque fois que le courant est transmis, mais seulement dans les parties où il passe, un bruit sec, une crépitation semblable à celle de l'étincelle, et qui ne se transforme en un son distinct que dans la portion tendue, si c'est un fil qui est dans le circuit.

Tels sont les faits établis par les recherches de M. Wertheim; ils sont de nature à confirmer la déduction que j'avais tirée avant lui, de l'étude seule des phénomènes sonores, savoir que l'aimantation ou le passage du courant électrique produisent un dérangement moléculaire dans les corps magnétiques, et que les sons proviennent des oscillations qu'éprouvent les particules des corps autour de leur position d'équilibre, sous l'influence des courants, soit extérieurs soit transmis. Mais quelle est maintenant la nature de ce dérangement moléculaire, et comment peut-il déterminer, soit les effets mécaniques, soit les effets sonores que nous avons décrits?

Quand il s'agit de l'action des courants extérieurs, on peut se faire une idée assez exacte de la nature du dérangement moléculaire que l'aimantation détermine. Il n'y a qu'à, pour cela, remonter à l'expérience dans laquelle on place, soit des bouts de fil, soit de la limaille de fer, dans l'intérieur d'une hélice dont l'axe est vertical. Aussitôt qu'on fait passer un courant par le fil de cette hélice, les bouts de fil de fer se placent tous parallèlement à l'axe, c'est-à-dire verticalement, et la limaille se dispose en petites pyramides allongées dans le sens de l'axe, qui se détruisent et se reforment rapidement quand le courant est intermittent. L'action de l'hélice sur la limaille consiste donc à la grouper sous forme de filets parallèles à l'axe, filets que la pesanteur seule empêche d'être aussi longs que l'hélice elle-

même. Cette expérience réussit aussi bien avec de la poudre de fer impalpable qu'avec de la limaille; elle réussit également bien avec la poudre de nickel et de cobalt. Seulement, si le courant qui traverse l'hélice est discontinu, on observe des effets assez différents avec chacun de ces trois métaux, effets qui dépendent, quant à leur nature particulière, du nombre plus ou moins grand d'interruptions qu'éprouve le courant dans un temps donné. Les pyramides de limaille sont à leur maximum de hauteur quand le disque qui les porte est au milieu de l'hélice. Elles tournoient sous l'influence des courants discontinus, pourvu que la succession de ces courants ne soit pas trop rapide, de manière qu'il n'y en ait pas plus de 60 à 80 par seconde. Avec 160, il n'y a plus d'effet du tout. Ces différences tiennent sans doute à ce que le fer, même le plus doux, a encore un peu de force coercitive, et qu'il lui faut un certain temps pour s'aimanter et se désaimanter. En comparant, sous ce rapport, le *fer*, le *nickel* et le *cobalt*, réduits tous en poudre impalpable et préparés par l'hydrogène, on trouve que le nickel manifeste encore des mouvements pour une vitesse de succession des courants à laquelle le fer n'en manifeste plus, et que le cobalt cesse au contraire d'en manifester avant le fer, ce qui est bien d'accord avec ce qu'on sait sur la force coercitive de ces trois métaux.

Voici encore une expérience de M. Grove, qui démontre d'une manière élégante cette tendance des particules des corps magnétiques à se grouper, sous l'influence de l'aimantation, dans une direction longitudinale ou axiale. Un tube de verre, fermé à ses deux extrémités par deux plaques de verre, est rempli d'eau, tenant en suspension une poudre fine d'un oxyde magnétique de fer. En regardant à travers ce tube des objets éloignés, on s'aperçoit qu'une proportion considérable de la lumière est interceptée par la dissémination irrégulière des particules solides dans l'eau. Mais dès qu'un courant électrique parcourt le fil d'une hélice dont le tube est entouré, les particules de l'oxyde se disposent d'une manière régulière et symétrique, de façon à permettre à la plus grande proportion de la lumière de passer. Les particules ne sont point ici des petits bouts de fil de

fer désagrégés artificiellement d'une masse plus considérable, mais du fer précipité chimiquement, et par conséquent dans son état moléculaire naturel, tel qu'il constitue par son agrégation le corps solide.

Cette disposition des particules du fer et des corps magnétiques à se rapprocher dans le sens transversal et à s'étendre dans le sens longitudinal, sous l'influence d'une aimantation extérieure qui tient probablement à la forme des molécules élémentaires et à la manière dont elles sont polarisées, est maintenant établie d'une manière irréfragable par des preuves directes et purement mécaniques.

Il est facile de voir qu'elle rend compte, de la manière la plus claire, de la production du son dans une barre ou dans un fil de fer soumis à l'influence du courant intermittent de l'hélice. Les particules luttant avec la cohésion se disposent dans le sens longitudinal quand le courant agit, et reviennent à leur position primitive dès qu'il cesse; il en résulte une série d'oscillations isochrones avec l'intermittence du courant. Tous ces effets sont beaucoup plus prononcés dans le fer doux que dans l'acier ou le fer écroui, parce que les particules du fer doux sont beaucoup plus mobiles autour de leur position d'équilibre.

J'ai également observé que, soit le fer, soit l'acier, lorsqu'ils sont déjà aimantés d'une manière permanente par le courant transmis à travers une seconde hélice ou par l'action d'un aimant ordinaire, éprouvent des vibrations moins fortes quand le courant discontinu tend à les aimanter dans le sens où ils le sont déjà, et plus fortes dans le cas contraire. Il est évident que, dans le premier cas, les particules ont déjà, d'une manière permanente, à peu près la position que l'action extérieure à laquelle elles sont soumises tend à leur imprimer, tandis que, dans le second cas, elles en sont plus éloignées qu'elles ne le sont dans leur état naturel. Il doit donc en résulter pour elles des oscillations bien plus fortes autour de leur position d'équilibre dans le second cas, et bien moins fortes dans le premier, que lorsqu'elles se trouvent dans leur position naturelle au moment où le courant discontinu vient à exercer son action.

Les effets du courant transmis sont dus à une action du même ordre, mais agissant dans un sens différent. Pour bien analyser cette action, il faut étudier la distribution de la limaille de fer autour d'un fil de fer ou d'un métal quelconque traversé par un fort courant électrique. Cette limaille se place toujours de façon à former des lignes perpendiculaires à la direction du courant, et par conséquent parallèles entre elles. C'est ce qu'on aperçoit très-bien en encastrant le fil conducteur dans une rainure pratiquée dans une planchette de bois recouverte d'une feuille de papier sur laquelle est la limaille. Celle-ci se dispose transversalement au-dessus du fil, quelle que soit la manière dont il est contourné, en formant de petits filets de 3 à 4 millimètres de longueur, qui présentent à leurs deux extrémités des pôles opposés. Quand le fil conducteur est libre, ces filets, au lieu de rester rectilignes, se rejoignent par les deux bouts et enveloppent la surface du fil en formant autour d'elle une courbe fermée comme une espèce d'enveloppe composée d'anneaux qui se recouvrent et sont serrés les uns contre les autres. Or l'arrangement que les particules de limaille de fer affectent autour d'un fil conducteur quelconque, aussi bien de fer que de tout autre métal, lorsqu'il transmet un courant, les molécules de la surface même d'un fil de fer doux traversé lui-même par un courant doivent l'affecter également sous l'influence du courant transmis par la masse entière du fil. C'est d'ailleurs ce que démontrent également les effets mécaniques étudiés par MM. Joule et Beatson. Il en résulte donc que, lorsque le courant transmis est intermittent, les particules de la surface du fil de fer oscillent entre la position transversale et leur position naturelle, et qu'il y a, par conséquent, production de vibrations. Ces oscillations doivent être d'autant plus faciles, et par conséquent les vibrations d'autant plus fortes, que le fer est plus doux ; avec le fer écroui, et surtout avec l'acier, il y a une plus grande résistance à vaincre, aussi l'effet est-il moins sensible. Si le fil qui transmet le courant discontinu est lui-même traversé par un courant dirigé dans le même sens que le discontinu, le mouvement oscillatoire doit être annulé, ou du moins diminué notablement, puisque la transmission du courant con-

tinu imprime d'une manière permanente aux particules la position que tend à leur donner d'une manière temporaire le passage du courant discontinu. Aussi le son, dans ce cas, disparaît complétement ou diminue notablement. Si le fil est d'acier ou de fer bien écroui, le courant continu favorise au contraire, par sa présence, l'action oscillatrice du courant discontinu, parce qu'il dérange les particules de leur position normale, sans pouvoir néanmoins leur imprimer complétement la direction transversale, à cause de la trop grande résistance qu'elles offrent à un déplacement qui, dans le fer doux, s'opère très-facilement. Les deux courants réunis produisent ce qu'un seul ne pourrait faire ou ferait moins bien, et le son est alors renforcé, ainsi que le prouve l'expérience.

J'ai trouvé, à l'appui de l'explication que je viens de donner, qu'un fil de cuivre recouvert d'une enveloppe mince de fer qui lui est contiguë donne naissance aux mêmes effets, à l'intensité près, lorsque le courant discontinu le traverse, que s'il est entièrement de fer; le son est seulement moins musical, il ressemble à celui que M. Wertheim a désigné sous le nom de bruit de ferraille. Comme on pourrait attribuer ce résultat à ce qu'une partie du courant traverse l'enveloppe de fer elle-même, au lieu de circuler exclusivement à travers le fil de cuivre, j'isole ce dernier au moyen d'une couche de soie ou de cire, de façon que le cylindre de tôle qui l'entoure ne puisse communiquer métalliquement avec le cuivre. L'effet est exactement le même que dans le cas précédent; c'est-à-dire que le courant discontinu qui traverse le fil de cuivre détermine dans l'enveloppe de fer une série de vibrations, ce qui prouve qu'on peut admettre que le même effet est produit sur la surface d'un fil de fer qui lui-même transmet le courant. Quant à l'enveloppe, on peut constater facilement qu'elle éprouve une aimantation transversale quand le fil de cuivre est dans le circuit voltaïque; car si on y ménage une petite fente longitudinale, on voit que la limaille de fer y est attirée sur les deux bords qui ont d'ailleurs une polarité opposée.

L'explication détaillée que nous venons de donner des phénomènes moléculaires qui accompagnent dans les corps magné-

tiques l'action des courants, soit extérieurs, soit transmis, trouve une nouvelle confirmation dans l'observation de plusieurs faits de différents genres. Ainsi j'ai remarqué que l'aimantation permanente imprimée soit par l'action d'une hélice enveloppante, soit par l'influence d'un fort électro-aimant à une tige de fer doux, augmente d'une manière très-prononcée l'intensité des sons que cette tige rend quand elle est traversée par un courant discontinu. Ce renforcement tient en effet évidemment à la lutte qui s'établit entre la direction longitudinale que l'influence de l'aimantation imprime aux particules du fer et la direction transversale que le passage du courant tend à leur donner. Les oscillations des particules doivent avoir nécessairement plus d'amplitude, puisqu'elles ont lieu entre des positions plus extrêmes. L'effet est plus prononcé avec des tiges de fer doux qu'avec celles d'acier, et surtout d'acier trempé. M. Beatson est arrivé à un résultat semblable par une tout autre méthode. Il a observé que si un courant continu traverse un fil, et si en même temps il est soumis à l'action d'une hélice dans laquelle passe un courant discontinu, ce fil éprouve une série d'expansions et de contractions qui deviennent inappréciables si le courant continu cesse d'être transmis, lors même que l'hélice continue à agir de la même manière. L'auteur en tire la même conclusion que j'avais déduite des effets sonores; savoir, que l'action de l'hélice imprime aux particules du fer un état opposé à celui que produit l'action du courant transmis, et que l'une de ces actions a la tendance à intervertir dans les particules l'arrangement que l'autre tend à établir.

Un fait assez curieux, c'est que l'aimantation semble imprimer aux particules du fer doux un arrangement semblable à celui qu'elles possèdent dans l'acier trempé, même avant qu'il soit aimanté. Ce qui confirme l'exactitude de cette remarque, c'est que le son que le fer doux aimanté rend sous l'action du courant transmis, non-seulement est plus fort que lorsqu'il n'y a pas d'aimantation, mais acquiert aussi un ton sec particulier qui le fait ressembler à celui que rend l'acier sans être aimanté.

L'influence si remarquable de la tension qui, au delà d'une certaine limite, diminue dans les fils de fer doux leur aptitude

à rendre des sons, est encore une conséquence de notre explication. En effet, les molécules éprouvent par l'effet de la tension un dérangement permanent dans leur position normale, et se trouvant par conséquent gênées dans leurs mouvements, ne peuvent plus exécuter au même degré, sous l'action de causes extérieures ou intérieures, les mouvements oscillatoires, et par conséquent les vibrations qui constituent le son.

Deux faits d'un genre tout différent de ceux qui précèdent viennent encore montrer que l'aimantation du fer est toujours accompagnée d'un changement moléculaire dans sa masse. Le premier de ces faits a été découvert par M. Grove; il consiste en ce qu'une armature de fer doux éprouve une élévation de température de plusieurs degrés, quand on l'aimante et qu'on la désaimante plusieurs fois de suite au moyen d'un électro-aimant ou d'un aimant ordinaire qu'on met en rotation devant elle. Le cobalt et le nickel présentent le même phénomène, mais à un degré un peu moindre; tandis que les métaux non magnétiques, placés exactement dans les mêmes circonstances, ne présentent pas la moindre trace d'effets calorifiques. Cette expérience ne peut s'expliquer qu'en admettant que le dégagement de la chaleur provient des changements moléculaires qui accompagnent l'aimantation et la désaimantation. Le second fait, qui n'est pas moins important, est dû à M. Maggi, de Vérone, qui a démontré qu'une plaque circulaire d'un fer doux parfaitement homogène conduit la chaleur avec plus de facilité dans une direction que dans l'autre, quand elle est aimantée par un puissant électro-aimant, tandis que dans son état naturel sa conductibilité est la même dans toutes les directions. La plaque est recouverte d'un enduit mince de cire fondue avec de l'huile, et la chaleur lui arrive à son centre par un tuyau qui la traverse et dans l'intérieur duquel chemine de la vapeur d'eau bouillante. La plaque est posée horizontalement sur les deux pôles d'un fort électro-aimant; plusieurs cartons isolants empêchent le contact entre elle et le fer de l'électro-aimant. Tant qu'elle demeure dans son état naturel, les courbes qui limitent la cire fondue prennent la figure circulaire, ce qui indique une conductibilité uniforme pour la chaleur dans tous les sens. Mais, dès

que l'électro-aimant est aimanté, les courbes se déforment et s'allongent toujours dans une direction perpendiculaire à la ligne qui joint les pôles magnétiques, ce qui prouve que la conductibilité est meilleure dans le sens perpendiculaire à l'axe magnétique que dans le sens de l'axe; résultat qui s'accorde avec le fait que nous avons établi que les particules du fer se rapprochent par l'effet de l'aimantation dans le sens perpendiculaire à la longueur de l'aimant, et s'éloignent dans le sens de cette longueur, qui est toujours l'axe magnétique.

Dans la théorie d'Ampère comme dans celle de Coulomb, nous avons admis que, soit les courants électriques, soit les deux magnétismes, préexistent dans les particules des corps magnétiques, et que l'aimantation consiste à imprimer à ces courants une direction uniforme ou à séparer les deux magnétismes en donnant à chacun d'eux une direction déterminée. Les phénomènes moléculaires que nous venons d'étudier sont de nature à nous faire présumer que, si l'on admet la théorie de Coulomb, les particules ont toujours une polarité magnétique, et que l'aimantation consiste à leur donner un arrangement qui mette en évidence cette propriété dont elles sont douées et non à la développer chez elles. Dans la théorie d'Ampère, il faut admettre que les courants ont dans chaque particule une direction invariable, de sorte que ce ne sont pas les courants, mais les particules elles-mêmes qui, par l'action d'une force extérieure, doivent prendre la nouvelle position qui constitue l'aimantation.

§ 3. Influence des actions moléculaires sur l'aimantation produite par l'électricité dynamique.

L'intime liaison qui paraît exister entre l'arrangement des particules des corps et leur magnétisme ne découle pas seulement des phénomènes qui démontrent l'influence de l'aimantation sur l'état moléculaire, mais aussi de ceux qui constatent l'influence des forces moléculaires sur l'aimantation. Nous avons déjà vu, dans le chapitre Ier, que la chaleur, la tension et les actions qui changent la position relative des particules,

modifient la capacité magnétique des corps. M. Lagehrjelm a observé que le fer, et surtout le fer doux, devient fortement magnétique par la rupture; et nous savons que les forces mécaniques peuvent faciliter l'aimantation, et en particulier celle qui est produite par le globe terrestre. M. Matteucci a trouvé que la tension, la percussion et les actions mécaniques, non-seulement facilitent l'aimantation produite sur le fer doux par une hélice que traverse un fort courant, mais qu'elles contribuent aussi, quand le courant a cessé de passer, à détruire le magnétisme d'une manière très-rapide. Le même physicien a également observé que la torsion augmentait, quand elle ne dépassait pas certaines limites, l'aimantation opérée sur des aiguilles d'acier par des décharges de la bouteille de Leyde.

M. Marianini, qui a fait de nombreuses et intéressantes recherches sur l'aimantation, est parvenu à des résultats curieux sur l'aptitude que des barreaux de fer peuvent acquérir à être plus facilement aimantés dans un sens que dans l'autre, et même à être peu ou beaucoup aimantés par l'influence de la même cause. Quand un barreau de fer a été aimanté par un courant instantané qui circule autour de lui et qu'il a perdu cette aimantation par l'action d'un courant contraire, il est plus apte à être de nouveau aimanté dans le premier sens que dans le second. On peut, par des courants contraires, lui donner de même plus d'aptitude à être aimanté dans le second sens que dans le premier. L'augmentation d'aptitude qu'il acquiert à être aimanté dans un sens est égale à la perte d'aptitude qu'il éprouve à être aimanté dans l'autre. Mais, en réitérant sur un même barreau l'action des courants, l'accroissement d'aptitude dans un sens et la diminution correspondante dans l'autre deviennent toujours de plus en plus faibles. Les modifications d'aptitude pour acquérir l'aimantation sont accompagnées de modifications dans l'aptitude à perdre cette aimantation, mais dans ce sens que cette dernière est inverse de la première.

Voulant pénétrer plus avant dans l'étude des effets que nous venons de rappeler, M. Marianini a soumis du fer à diverses actions physiques et mécaniques. Il s'est assuré préalablement que ni l'élévation de température, ni surtout le refroidissement

qui la suit, ni la percussion, ni la torsion, ni un choc violent, ni aucune action mécanique, même la plus énergique, ne peuvent déterminer par elles-mêmes une aimantation; la décharge d'une bouteille de Leyde, à travers un barreau de fer, ne l'aimante pas davantage. Mais ces diverses opérations, incapables d'aimanter, peuvent toutes servir à détruire la polarité des corps aimantés; la quantité de force magnétique qu'ils perdent ainsi, lorsque leur aptitude n'a point été altérée, est d'autant plus grande que l'aimantation a été plus faible. Mais si, après avoir éprouvé l'une de ces actions, le barreau a conservé encore un peu de magnétisme, il ne pourra plus le perdre par cette action ni par une autre semblable.

Ce qu'il y a d'assez remarquable, c'est que, lorsqu'on a détruit l'aimantation d'un barreau en l'aimantant en sens contraire par une suite de courants instantanés, et de telle façon que son magnétisme soit nul, on peut lui rendre son premier magnétisme au moyen d'un choc violent, en le laissant tomber sur le pavé d'une hauteur de deux mètres, par exemple. Plus est grande la hauteur de la chute, plus le magnétisme qu'il récupère est fort. Ainsi, un barreau qui faisait dévier une aiguille de 60° ayant été amené, par une suite de décharges, à ne plus exercer qu'une déviation de 0°, en donna une de 14° en tombant d'une hauteur de 4 mètres, de 15° 30 en tombant d'une hauteur de 5 mètres, et de 21' en tombant d'une hauteur de 2 mètres. Sa polarité nouvelle était la même que la primitive.

Lors même qu'en détruisant l'aimantation primitive du barreau on a été jusqu'à lui en imprimer une nouvelle en sens contraire, on trouve qu'en le laissant tomber sur le pavé on lui rend la première qu'il possédait. M. Marianini serait disposé à croire, d'après cette expérience et d'autres semblables, que le barreau avait gardé sa première aimantation, tout en en prenant une contraire, qui neutralise l'effet de la première ou le dépasse, et que le choc ne ferait que détruire la seconde en tout ou partie, ce qui permettrait à la première de reparaître. La flexion, le frottement, la chaleur ou une décharge électrique qui traverse directement le fer, peuvent remplacer le choc, en

particulier, quand il s'agit de fils de fer fins. L'acier donne les mêmes résultats que le fer.

M. Marianini, pour expliquer les résultats de ses expériences, admet une différence entre ce qu'il nomme la *polarité* et le *magnétisme*. Ainsi le même aimant, quoique privé de polarité, peut très-bien conserver encore du magnétisme, lorsqu'aimanté à la fois en deux sens contraires, avec une force égale, il ne manifeste aucune action extérieure. Il faut alors supposer que deux systèmes magnétiques contraires se faisant équilibre peuvent exister dans le fer, et que des forces extérieures, telles qu'un courant ou une action mécanique, n'agissent pas avec la même énergie sur les deux systèmes opposés. Cette opinion, qui ne nous paraît pas reposer sur des faits encore assez nombreux, n'a rien cependant d'inadmissible; rien ne s'oppose, en effet, à ce que, dans le même barreau, un certain nombre de particules soient disposées de façon à produire une aimantation dans un certain sens, et, d'autres, de façon à produire une aimantation en sens contraire; que, par exemple, les particules intérieures se trouvent, à cet égard, avoir une disposition opposée à celles de la surface, et que telle action extérieure agisse proportionnellement avec plus de force sur les unes que sur les autres. Ce point aurait besoin d'être éclairci par des observations ultérieures, et notamment par des expériences comparativement faites sur des barreaux de différentes formes et de dimensions diverses, sur des cylindres creux et pleins, par exemple.

Mais s'il règne encore quelque doute sur les conclusions que M. Marianini a tirées de ses expériences, il n'y en a pas sur la nouvelle preuve qu'elles apportent en faveur de la liaison entre les phénomènes magnétiques et les phénomènes moléculaires. Les différents degrés d'aptitude qu'acquiert le fer, sous l'empire de certaines actions, à être plus facilement aimanté dans un sens que dans l'autre, sont tout à fait en harmonie avec la disposition que revêtent les particules des corps à s'arranger plus facilement dans une certaine direction que dans une autre. Cette perte de l'aptitude, après la répétition multipliée d'actions contraires, correspond avec l'indifférence à s'arranger, d'une manière ou d'une autre, que finissent par présenter les parti-

cules des corps après avoir éprouvé des dérangements nombreux en divers sens [1]. Enfin, les effets remarquables du choc, de la flexion, de la chaleur, en un mot de toutes ces actions qui changent la position relative des particules, viennent à l'appui du rapport que nous avons cherché à établir.

M. Wertheim vient encore récemment de démontrer l'action toute spéciale qu'exerce la torsion sur des tiges et des fils de fer dans le phénomène de l'aimantation, en forçant les molécules matérielles à se disposer en spirales, et en donnant ainsi à la matière elle-même la forme qu'Ampère a assignée aux courants moléculaires. Il a trouvé que la torsion produit des effets magnétiques temporaires lorsqu'elle est temporaire, et permanents lorsqu'elle est permanente; et ces effets ne peuvent être reproduits par aucun autre mode d'action des forces mécaniques. L'aimantation, dans les expériences de M. Wertheim, était produite par un courant électrique circulant dans une hélice dont la tige de fer doux occupait l'axe; et on pouvait constater l'influence que la torsion et la détorsion exerçaient sur le magnétisme de ce fer par un procédé très-délicat fondé sur le développement d'un courant d'induction dans une seconde hélice dont les deux extrémités communiquaient avec le fil d'un galvanomètre; nous reviendrons sur ce point dans le chapitre cinquième consacré à l'induction. Toutefois nous pouvons déjà dire ici que, par ce procédé, M. Wertheim s'est assuré qu'une barre de fer aimantée à saturation se désaimante partiellement au moment où elle éprouve une torsion temporaire, et se réaimante au moment de la détorsion. Si, au contraire, la barre de fer (ou un faisceau de fils de fer) a été aimantée sous l'empire d'une forte torsion permanente par le courant terrestre ou le courant de l'hélice, toute torsion ou détorsion temporaire qui agit sur elle dans le sens de sa torsion permanente produit une aimantation; toute torsion ou détorsion qui agit en sens contraire produit une désaimantation. Ainsi, dans le premier cas, l'aimantation déjà existante est augmentée; dans le second elle est diminuée.

[1] On en a un exemple remarquable dans la fragilité que présente le fer quand il a été pendant longtemps soumis à des vibrations rapides et fréquentes, comme dans les essieux des locomotives.

L'aimantation semble donc intimement liée avec l'arrangement des molécules, ce qui est favorable à l'idée sur laquelle nous reviendrons, que ces molécules sont originellement aimantées et que l'aimantation ne consiste qu'à les disposer de façon que leurs magnétismes, qui dans l'état naturel se dissimulent mutuellement, deviennent sensibles.

§ 6. Considérations sur les électro-aimants.

Après avoir étudié tous les phénomènes qui accompagnent et les actions qui facilitent l'aimantation opérée par les courants électriques, nous devrions revenir sur les propriétés des électro-aimants, analyser les causes qui influent sur leur intensité et les lois qui la régissent, et décrire les formes diverses qu'on leur a données. Ainsi nous aurions à exposer les lois des électro-aimants de Lenz et Jacobi, les recherches de M. Feitzlich sur la pénétration de l'aimantation dans le fer doux, celles de M. Dub sur la force attractive des électro-aimants, celles de M. Poggendorff sur les propriétés des électro-aimants fermés, c'est-à-dire dont les pôles sont réunis par une armure, et enfin celles toutes récentes de M. Nicklès, sur les électro-aimants circulaires. Mais, outre que l'étude approfondie de ce sujet exige des connaissances que nous n'avons pas encore, il nous a paru que ces questions présentant surtout un intérêt d'application, il y avait avantage à renvoyer leur examen au chapitre de notre sixième partie, où nous nous occuperons des applications électro-magnétiques.

Les principaux travaux dont il est question dans ce chapitre sont :

Arago. — Aimantation par les courants et les décharges électriques. — *Annales de chimie et de physique.* T. XV (1820), p. 82, 93 et 393.

Davy. — Aimantation d'une aiguille d'acier. *Bibl. univ.* T. XVII, p. 191.

Nobili. — Aimantation par une spirale plate. *Bibl. univ.* T. XXVII, p. 174.

Savary. — Aimantation. *Annales de ch. et de phys.* T. XXXIV (1827), p. 5.

Abria. — Aimantation par les courants. *Annales de chimie et de physique.* 3me, série, t. I (1841), p. 385.

Delesse. — Magnétisme des roches. — *Archives des sc. phys.* T. X, p. 207.

Moll. — Aimantation du fer doux par les courants. — *Annales de chimie et de physique.* T. L, (1832), p. 324, et t. LVI (1834), p. 222.

Alexandre. — Influence de la chaleur sur l'aimantation par les courants. — *Archives de l'électricité.* T. III, p. 658.

Froment. — Instrument magnétique à lame vibrante. — (*Bibl. univ.*). *Archives des sciences physiques.* T. IV, p. 294.

Nicklès. — Construction des électro-aimants. — *Annales de chimie et de physique* (3[me] série). T. XXXVII, p. 399.

Page. — Son produit par l'aimantation. *Bibliothèque universelle* (*nouvelle série*). T. II (1839), p. 398.

Delezeune. — *Idem.* T. XVI (1841), p. 406.

Liphaus et *Quetelet.* — Aimantation du fer par les courants. — (*Annales de chimie et de physique.* T. L (1832), p. 331.

Marrian. — Son par l'aimantation. — *Archives de l'électricité.* T. V, p. 195.

Beatson. — Son par le courant transmis. *Idem.* T. V, p. 197.

Idem. — Expansion du fer par le passage du courant. — (*Bibl. univ.*). *Archives des sciences physiques* T. II, p. 113.

De la Rive. — Sons produits dans le fer par l'aimantation et les courants transmis et phénomènes moléculaires. *Annales de ch. et de phys.* (3[me] série). T. XVI, p. 93 et t. XXVI, 158. — *Archives de l'électricité.* T. V, p. 200. — (*Bibl. univ.*). *Archives des sc. phys.* T. IX, p. 193 et 265.

Wertheim. — Sons produits par l'aimantation et influence des actions moléculaires. — *Annales de ch. et de phys.* (3[me] série). T. XXIII, p. 302. — *Comptes rendus de l'Ac. des sc.* T. XXIII, p. 336, et (*Bibl. univ.*). *Arch. des sc. phys.* T. XXI, p. 223.

Guillemin. — Influence de l'aimantation sur le fer doux. *Compte rendu des séances de l'Académie des sciences* (1846). T. XXII, p. 264.

Joule. — Influence de l'aimantation sur les dimensions du fer. — (*Bibl. univ.*). *Archives des sciences physiques* T. IV, p. 398 et t. V. p. 51.

Grove. — Arrangement des particules par l'aimantation, et chaleur produite. — (*Bibl. univ.*). *Archives des sciences physiques* T. X, p. 182 et t. XI, p. 210.

Maggi. — Influence de l'aimantation sur la conductibilité du fer pour la chaleur. — (*Bibl. univ.*). *Archives des sciences physiques* T. XIV, p. 132.

Marianini. — Influence des actions moléculaires sur l'aimantation. — *Annales de chimie et de physique* (3[me] série). T. XIII, p. 237 et t. XVI, p. 430 et 448.

Matteucci. — Aimantation par le courant. (*Bibl. univ.*). *Archives des sciences physiques* T. V, p. 55.

Wartmann. — Sons produits par le courant électrique. — (*Bibl. univ.*). *Archives des sciences physiques* T. I, p. 419.

CHAPITRE IV.

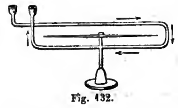
GALVANOMÈTRES MULTIPLICATEURS.

§ 1. Galvanomètres électro-magnétiques.

Nous avons indiqué, dans la première partie de cet ouvrage, qu'on pouvait se servir des propriétés calorifiques et chimiques du courant voltaïque pour mesurer son intensité, et nous avons même donné quelques détails sur les voltamètres fondés sur ces propriétés. Mais l'action qu'exerce un courant sur une aiguille aimantée a fourni un moyen à tous égards bien supérieur aux précédents pour constater l'existence et apprécier la force d'un courant électrique. Cette action, en effet, est la seule qui soit générale, c'est-à-dire qui accompagne toujours et dans tous les cas la présence de l'électricité dynamique, quelles que soient la nature du circuit et la faiblesse de cette électricité, tandis que les autres actions n'ont lieu que lorsque le circuit renferme un conducteur susceptible de les manifester et que le courant est doué d'une certaine énergie. Il y a plus : l'effet électro-magnétique du courant est instantané, tandis que l'effet électro-chimique doit nécessairement durer un certain temps pour être apprécié; et si l'action calorifique est également instantanée, elle a l'inconvénient de ne pas donner la direction du courant, tandis que cette direction est indiquée, de la manière la plus prompte et la mieux prononcée, par le sens de la déviation de l'aiguille aimantée.

Nous avons vu qu'un conducteur traversé par un courant placé *au-dessus* d'une aiguille, mais très-près d'elle et parallèlement à son axe, fait dévier cette aiguille à l'est ou à l'ouest, suivant qu'il est dirigé du nord au sud ou du sud au nord. S'il est *au-dessous*, il l'a fait dévier à l'est quand il est dirigé du sud au nord, et à l'ouest quand il est dirigé du nord au sud. Il en

résulte que, si le conducteur qui transmet le courant, passant d'abord au-dessus de l'aiguille, est replié de façon à revenir par-dessous, et à former ainsi deux branches parallèles entre lesquelles l'aiguille est suspendue (fig. 132), le courant qui parcourt la branche supérieure tend à faire dévier l'aiguille dans le même sens que le courant qui traverse l'inférieure, précisément parce qu'il a dans la première une direction contraire à celle qu'il a dans la seconde. En disposant ainsi le fil qui transmet le courant, on obtient une action sur l'aiguille deux fois plus forte que si, demeuré rectiligne au lieu d'être replié, il n'agissait que dessus ou dessous. Mais, au lieu de le replier une seule fois, on peut le replier deux fois, ce qui double encore l'effet, trois fois, ce qui le triple; en un mot, on peut faire faire au fil un très-grand nombre de tours, et multiplier ainsi d'une quantité considérable l'action du courant sur l'aiguille aimantée. Il en résulte qu'un courant très-faible, dont l'effet serait à peine sensible, si le fil qui le transmet ne faisait qu'une circonvolution, peut exercer une action très-marquée lorsque le nombre des circonvolutions devient considérable. Aussi a-t-on nommé cet appareil *galvanomètre multiplicateur*. On le nomme aussi quelquefois, et avec raison, *rhéomètre*, mesureur de courant. C'est à un savant allemand, M. Schweigger, qu'on doit la première idée du galvanomètre multiplicateur.


Fig. 132.

On a soin, pour le construire, de prendre un fil de cuivre recouvert de soie, afin que les différents tours puissent être juxtaposés et superposés sans qu'il y ait une communication métallique directe d'une circonvolution à l'autre, et que le courant puisse ainsi parcourir le fil dans toute sa longueur. On enroule le fil autour d'un châssis en bois ou en métal solidement fixé sur un pied, et qui laisse entre sa face inférieure et sa face supérieure le plus petit espace possible; c'est dans l'intérieur de cet espace qu'on suspend l'aiguille aimantée; les deux bouts du fil, qu'on a soin de dépouiller de la soie qui les recouvre, ser-

vent à mettre le galvanomètre, c'est-à-dire le fil de l'instrument, dans le circuit (fig. 133). Au moment où un circuit est ainsi fermé, on voit, pour peu qu'un courant s'y propage, l'aiguille se mouvoir; le sens dans lequel elle se meut indique la *direction* du courant dont son mouvement vient d'accuser la *présence*, et le nombre de degrés où la grandeur de la déviation permet d'en apprécier *l'intensité*.

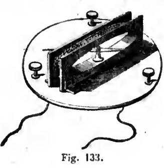


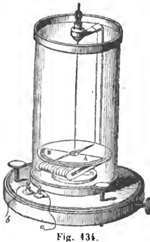
Fig. 133.

§ 2. Galvanomètre multiplicateur de Nobili.

Pour augmenter la sensibilité du galvanomètre multiplicateur, M. Nobili a eu l'ingénieuse idée de neutraliser la force directrice du magnétisme terrestre qui tend, en opposition à l'action du courant, à maintenir l'aiguille dans sa direction normale ou à l'y ramener, en employant, au lieu d'une seule aiguille aimantée, deux aiguilles que l'on fixe parallèlement l'une à l'autre, les pôles inverses en regard, aux deux extrémités d'une petite tige de paille ou de métal qui passe par leurs centres de gravité. L'une des aiguilles est placée en dedans du châssis, et l'autre en dehors, de sorte que, comme il est facile de le voir, la déviation que le courant tend à imprimer à la première s'accorde avec celle qu'il opère sur la seconde, la position de leurs pôles étant pour l'une inverse de ce qu'elle est pour l'autre; car si elles avaient leurs pôles homogènes tournés du même côté, elles dévieraient au contraire en sens opposé, l'une étant au-dessus et l'autre au-dessous. Il résulte ainsi de l'addition de cette seconde aiguille, une augmentation considérable de sensibilité dans l'appareil. Il faut que les deux aiguilles soient aussi semblables que possible; on les suspend à un fil de coton que l'on fixe à l'extrémité supérieure de la petite tige qui les unit. Si elles avaient exactement la même force magnétique, ce système serait *astatique*, c'est-à-dire n'éprouverait aucune ac-

tion directrice de la part de la terre et resterait en équilibre dans tous les azimuts. Ce résultat serait difficile à obtenir; d'ailleurs il est nécessaire que le système des deux aiguilles ait une légère force directrice pour pouvoir prendre une position déterminée, et que par conséquent l'une des aiguilles ait un megnétisme un peu plus fort que l'autre.

Il faut avoir soin, dans la construction du galvanomètre, de choisir un fil de cuivre aussi dépouillé de fer que possible, ce qui n'est pas toujours facile; à cet égard, le cuivre rouge est préférable. Quant aux dimensions du fil, elles dépendent du genre de circuit dans lequel il doit être introduit. Si c'est un circuit dont la conductibilité soit imparfaite, qui renferme des liquides, par exemple, il est avantageux d'avoir un fil long et fin, par conséquent, pour que ses circonvolutions soient aussi rapprochées que possible de l'aiguille; en effet, l'introduction dans le circuit d'un semblable fil n'en modifie pas sensiblement la conductibilité. Mais si le circuit est bon conducteur, tout métallique, par exemple, alors le courant serait trop affaibli par l'addition d'un fil long et fin, et on perdrait plus par cette cause d'affaiblissement qu'on ne gagnerait par l'augmentation de sensibilité de l'appareil, résultant d'un nombre plus considérable de circonvolutions. Il vaut mieux dans ce cas employer un fil plus court et d'un diamètre plus considérable. Nous aurons l'occasion de traiter d'une manière générale cette question qui tient à la propagation de l'électricité dynamique, dans la quatrième partie de cet ouvrage. Pour le moment, nous nous bornerons à décrire le galvanomètre multiplicateur de Nobili (fig. 134), en remarquant que, suivant le but auquel on se propose de l'appliquer, les dimensions du fil et le nombre de ses circonvolutions doivent varier, et si d'avance on n'a pas un but


Fig. 134.

bien déterminé, il est bon d'avoir toujours deux instruments à sa disposition, l'un à fil court, l'autre à fil long.

Voici d'abord les dimensions du châssis : la largeur est de 27 millimètres, la longueur de 40 millimètres; l'ouverture dans la partie supérieure de 5 millimètres; la hauteur extérieure entre les deux parties horizontales est de 4 millimètres, et la longueur intérieure entre les deux parois verticales est de 16 millimètres. C'est dans cet espace intérieur et vide de 10 millimètres de longueur sur 4 de hauteur, que se meut l'aiguille inférieure. La supérieure est située au-dessus du châssis, mais aussi près que possible des fils qui sont enroulés autour de lui. Le fil, recouvert de soie, a moins d'un sixième de millimètre de diamètre, et forme huit cents tours autour du châssis. Les aiguilles sont deux aiguilles ordinaires à coudre, de 36 millimètres de longueur et aimantées à saturation. Elles sont placées parallèlement l'une à l'autre, mais les pôles inverses en regard, à une distance de 15 millimètres, et fixées à chacune des extrémités de deux petits fils de cuivres tortillés l'un sur l'autre. Le fil de suspension est un fil de cocon dédoublé de 10 à 15 centimètres de longueur. Le châssis est placé sur un support mobile qui permet de lui donner toutes les positions possibles par rapport aux aiguilles. On le fixe dans ce but sur un pivot qui tourne sur son axe au moyen d'un engrenage à pignon, qu'on fait mouvoir à volonté dans un sens ou dans un autre par un bouton extérieur. Pour que ce mouvement du châssis puisse s'exécuter, il faut que les deux bouts du fil métallique recouvert de soie aient une longueur suffisante, entre le point où ils quittent le châssis et celui où ils sont fixés au cadre de l'instrument.

Le fil de cocon est fixé à une tige en potenee, et, au moyen d'un petit râteau mû par un engrenage, on peut faire descendre ou remonter le système des deux aiguilles, par degrés insensibles, de manière à le placer exactement à la hauteur voulue. Une division circulaire dont le centre coïncide exactement avec la prolongation du fil de suspension est placée audessus du châssis et des fils dont il est entouré. C'est sur cette division que l'aiguille supérieure marque les degrés de dévia-

tion. On ajuste ordinairement à l'une des extrémités de cette aiguille un bout de crin très-fin, qui marque les degrés de déviation sur le cercle divisé, dont les dimensions peuvent être ainsi rendues plus considérables. Quant aux aiguilles, quelques précautions qu'on prenne pour que le système qu'elles forment soit astatique, il reste néanmoins à ce système une force directrice appréciable, qui n'empêche pas que l'appareil ne possède un grand degré de sensibilité. Si la force directrice est trop grande, on la diminue au moyen d'un procédé indiqué par M. Nobili lui-même. On cherche celui des quatre pôles des deux aiguilles qui a le plus fort magnétisme; on lui en enlève une partie en le frottant légèrement avec le pôle opposé d'un barreau faiblement aimanté, et l'on continue jusqu'à ce que le système sorte du méridien magnétique pour s'approcher plus ou moins de la position perpendiculaire à ce méridien. On fait ensuite osciller le système, et l'on juge, d'après le nombre des oscillations dans un temps donné, si l'action du magnétisme terrestre est diminuée suffisamment. Il faut, comme nous l'avons déjà dit, ne laisser au système que juste la force directrice qui lui est nécessaire pour le maintenir dans une position fixe, afin qu'il puisse abandonner cette position sous l'action du courant le plus faible. C'est là la principale cause de la sensibilité de l'appareil; aussi doit-on faire tous ses efforts pour atteindre ce but.

L'instrument est recouvert d'une cloche de verre dont la partie supérieure est percée d'un trou qui laisse passer le bouton au moyen duquel on peut abaisser ou remonter la tige dentelée qui porte le fil de cocon.

Les galvanomètres multiplicateurs ne diffèrent entre eux que par les dimensions du fil de cuivre recouvert de soie; on en a dont le fil très-fin fait plus de mille à deux mille tours, comme aussi il en est dont le plus gros ne fait que quelques tours. Un fil de $\frac{2}{3}$ de millimètre de diamètre faisant trente tours est le type d'une galvanomètre à fil court.

L'isolément des tours est une condition importante à bien remplir, car si le courant électrique, au lieu de parcourir toutes les circonvolutions du fil, passait latéralement d'un con-

tour à l'autre, l'effet serait, sinon totalement annulé, du moins singulièrement affaibli. Cet isolement n'est pas toujours si facile à obtenir qu'on peut le penser; il faut que la soie qui recouvre le fil de métal soit bien serrée et forme une enveloppe passablement épaisse. Ces précautions sont surtout nécessaires quand on veut constater, au moyen d'un galvanomètre, le courant électrique qui résulte de la décharge du conducteur d'une machine électrique ou d'une bouteille de Leyde. M. Colladon, qui le premier a réussi à faire dévier une aiguille aimantée par l'action de ce courant, se servait d'un galvanomètre de 500 à 1,000 tours au moins, dont le fil était doublement recouvert de soie et dont chaque série de tours était séparée de la suivante par un taffetas gommé. Sans cette double précaution, l'électricité passerait facilement d'une circonvolution à une autre. Pour obtenir l'action de l'électricité d'une machine sur l'aiguille du galvanomètre, M. Colladon, après avoir mis l'une des extrémités du fil en communication avec les coussins de la machine, approchait l'autre, terminée par une pointe fixe et tenue par un manche isolant, à différentes distances du conducteur, pour soutirer l'électricité positive. A un décimètre de distance, la déviation était de 18°; à deux décimètres, elle n'était plus que de 10°; à 1 mètre, elle était encore de 2°.

Il est facile, comme on le comprend, de déterminer le sens du courant qui affecte un galvanomètre quand on sait le sens dans lequel le fil est enroulé autour du châssis, et qu'on connaît la position des pôles des deux aiguilles magnétiques. En effet, de même que, lorsqu'on sait la direction du courant, on peut déterminer d'avance le sens de la déviation de l'aiguille, de même, connaissant le sens de la déviation, on pourra en conclure la direction du courant. Il n'y a qu'à faire usage, pour cela, de la loi trouvée et formulée par Ampère. Mais il est plus court et plus commode d'obtenir cette détermination par une expérience directe, en faisant communiquer l'une des extrémités du fil de l'instrument avec une petite lame de zinc, et l'autre avec une plaque de cuivre ou de platine; on plonge ces deux lames dans de l'eau, puis on note le sens dans lequel se dévie l'aiguille supérieure, en se rappelant que le courant qui opère cette dévia-

tion va du cuivre au zinc à travers le fil du galvanomètre; telle sera également la direction de tout courant qui opérera une déviation dans le même sens, tandis que tout courant qui en opérera une en sens contraire aura une direction opposée. Pour ne pas avoir l'ennui de répéter plusieurs fois cet essai, on marque une lettre, la lettre *a* par exemple, sur le pied de l'instrument à la place où aboutit l'un des bouts du fil du galvanomètre, et la lettre *b* à la place où aboutit l'autre bout, puis la lettre *A* sur le côté de la division circulaire vers lequel tourne la pointe nord de l'aiguille supérieure quand le courant entre par *a*, et la lettre *B* sur le côté vers lequel tourne cette même pointe quand le courant entre par *b* (fig. 134). Il ne faut pas oublier qu'on doit avoir soin de tourner le cadre mobile de l'instrument, de façon que le système des fils soit parfaitement parallèle à la direction que prennent naturellement les aiguilles aimantées et que le pôle nord de l'aiguille supérieure soit placé entre *A* et *B*.

Une précaution très-importante, c'est de ne pas agir sur un galvanomètre avec un courant trop fort pour l'instrument, car l'action d'un semblable courant risque de modifier le magnétisme des aiguilles, soit en en diminuant l'intensité, soit même en le renversant; on altère ainsi beaucoup la sensibilité du galvanomètre, et on risque de faire erreur ensuite, soit sur la force, soit sur le sens des courants qu'on veut apprécier. Il est donc important d'avoir un certain nombre de galvanomètres de divers degrés de sensibilité, pour se servir, dans chaque cas, de celui qu'on estime être le mieux approprié à l'usage auquel on veut l'affecter.

Il arrive même souvent que l'aiguille d'un galvanomètre, en restant quelque temps sous l'influence d'un courant qui n'est pas très-fort, éprouve une modification dans son magnétisme. L'axe magnétique, ainsi que l'a observé Peltier, obéissant à l'action du courant qui tend à le placer perpendiculairement à sa propre direction, s'éloigne de l'axe de figure de l'aiguille. Il en résulte que cet axe faisant un angle plus grand avec le méridien magnétique, l'aiguille est sollicitée avec plus de force par le magnétisme terrestre, ce qui établit un nouvel équilibre entre les deux actions contraires, le magnétisme terrestre qui

tend à ramener l'aiguille à 0° et le courant qui tend à la pousser à 90° Quelques moments après qu'on a rompu le circuit, l'axe magnétique de l'aiguille revient à sa place primitive. Ainsi un courant constant fait dévier l'aiguille de 50°; au bout de dix minutes l'aiguille se rapproche du 0°, s'arrête à 49° et même à 48°; on rompt le circuit, et on laisse l'aiguille libre pendant une minute seulement; on la soumet de nouveau à l'action du courant; on retrouve les 50° primitifs, quoiqu'on ait eu soin, pendant le repos du galvanomètre, de tenir le circuit fermé, afin de ne rien changer aux circonstances de l'expérience; preuve que l'effet est bien dû à un dérangement de l'axe magnétique et non pas à un affaiblissement du courant.

§ 3. Galvanomètre très-sensible de Dubois-Reymond.

Dans un ouvrage récent sur l'électro-physiologie, M. Dubois-Reymond a apporté un soin tout particulier à étudier le galvanomètre à aiguille astatique, et les moyens d'augmenter la sensibilité de cet instrument au plus haut degré, pour arriver à percevoir les courants les plus faibles. Il a analysé avec beaucoup de détails et de sagacité les causes des irrégularités que présentent les galvanomètres très-délicats et qui en rendent souvent l'emploi difficile et peu sûr, et il a décrit les moyens de concilier la fidélité des indications de l'instrument avec sa sensibilité.

Il remarque d'abord que les axes des aiguilles n'étant jamais rigoureusement parallèles, soit à cause de quelques irrégularités dans l'aimantation, soit par l'effet de quelques défauts dans la suspension, il en résulte que le système des deux aiguilles n'est jamais exactement dans le méridien magnétique, et qu'il s'en écarte d'autant plus qu'il est plus complétement astatique. Et même si l'on diminue le magnétisme de la plus forte des deux aiguilles, de manière à rendre le système des deux aiguilles de plus en plus astatique, il en résulte qu'il se place perpendiculairement au méridien magnétique, cas dans lequel l'instrument atteint son maximum de sensibilité.

Une seconde cause de l'irrégularité de l'instrument est le

magnétisme du fil galvanométrique, qui provient probablement de la présence d'un peu de fer dans ce fil. Il en résulte que la position de l'aiguille aimantée, par rapport aux circonvolutions du fil, exerce une influence sur la direction dans laquelle elle se place. Ainsi, si l'aiguille étant en équilibre à une certaine distance du zéro de la graduation, on fait tourner le cadre de telle façon que le zéro vienne se placer sous l'aiguille, celle-ci semble s'en éloigner; mais en fait, elle se déplace moins que le zéro lui-même, de sorte que sa distance au zéro diminue; cependant il n'est jamais possible de la faire coïncider exactement avec le zéro, mais son éloignement du zéro finit par devenir un minimum. Si on déplace ce minimum, alors l'aiguille dépasse rapidement le zéro et se place en équilibre de l'autre côté et à une certaine distance de lui. Dans quelques cas rares, l'aiguille atteint une position d'équilibre stable au zéro lui-même; mais le plus souvent, c'est un équilibre instable qui se trouve entre les deux positions d'équilibre stable qui sont de chaque côté du zéro. M. Nobili, qui avait déjà observé ces effets, avait montré qu'ils étaient un résultat de l'action attractive exercée sur le système des deux aiguilles par les deux paquets du fil galvanométrique; actions qui s'accordent malgré la position inverse des pôles des deux aiguilles, parce que les fils agissent comme des corps magnétiques semblables au fer doux, et non comme des corps aimantés.

La combinaison des deux causes d'irrégularité que nous venons de signaler donne lieu à des résultats qui peuvent être appréciés exactement par le calcul, et qui varient suivant que le système des deux aiguilles est moins ou plus statique, parce que la part du magnétisme terrestre, dans cette action complexe, devient ainsi plus ou moins importante.

Pour varier ou du moins diminuer ces diverses causes de perturbation, on a proposé divers moyens de correction. Kleiner a indiqué l'emploi de petites masse de cuivre placées dans l'intervalle qui sépare les deux masses de fil galvanométrique, de manière à neutraliser l'action perturbatrice de chacune. Nobili cherchait à compenser l'attraction exercée par le fil du galvanomètre au moyen d'un barreau magnétique placé à distance.

M. Dubois-Reymond a perfectionné ce dernier moyen, qui avait l'inconvénient que l'aimant exerçait son action à peu près avec la même énergie dans toutes les positions de l'aiguille. Il a substitué à l'aimant un petit fragment d'une aiguille à coudre aimantée, long seulement de $1\frac{1}{2}$ millimètre, placé dans l'intérieur du galvanomètre, devant le zéro de la graduation.

L'action de ce petit aimant n'est sensible que tant que l'aiguille est près du zéro, et elle sert à compenser l'effet des causes perturbatrices. Mais aussitôt que l'aiguille est à quelques degrés du zéro, position par laquelle la compensation n'est plus nécessaire, le petit aimant n'a plus aucun effet.

C'est sur ce principe et en prenant plusieurs précautions très-minutieuses, que M. Dubois-Reymond est parvenu à construire un galvanomètre de 27,000 tours, aussi remarquable par son exactitude que par sa sensibilité. En particulier, les tours en sont si parfaitement isolés les unes des autres, qu'il accuse facilement les courants provenant des machines électriques ordinaires. Il a été construit par M. Dubois-Reymond, essentiellement en vue de percevoir les courants électriques qui peuvent exister dans les nerfs et dans les muscles.

§ 4. Galvanomètre différentiel.

Quand on veut comparer la force relative de deux courants, il est fort commode de se servir du galvanomètre différentiel (fig. 135). On appelle ainsi un galvanomètre formé de deux fils parfaitement égaux en longueur, en diamètre et de même nature, en un mot parfaitement semblables, qu'on enroule simultanément autour du cadre et qui se trouvent semblablement placés par rapport aux aiguilles, de telle façon que lorsqu'on fait passer par chacun d'eux des courants opposés et égaux, les aiguilles restent au 0°, c'est-à-dire n'éprouvent aucune déviation, à cause des deux actions égales et contraires auxquelles elles sont soumises. Mais si le système des aiguilles se meut, le sens dans lequel la déviation a lieu indique que l'un des courants est plus fort que l'autre et quel est le plus fort. L'amplitude de cette déviation permet d'apprécier approximativement

de combien il était le plus fort. Toutefois, pour avoir avec cet instrument des résultats comparatifs, il est préférable d'amener les deux courants à être égaux, ce qu'on peut apprécier

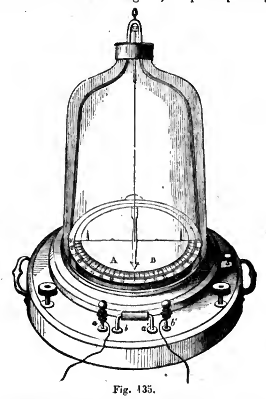


Fig. 135.

avec une grande précision; en même temps qu'on peut, comme nous le verrons dans la quatrième partie, déduire très-exactement la force relative des deux courants de la modification apportée au circuit du plus fort pour le rendre égal à l'autre.

Le galvanomètre différentiel a aussi l'avantage de pouvoir servir de galvanomètre à fil long ou à fil court. En effet, comme il y a deux fils, il y a quatre bouts aboutissant au pied de l'instrument. Soient *a*, et *b* les deux extrémités du premier fil *a'* et *b'* celles du second. Quand on veut avoir un galvanomètre à fil long, on réunit par un petit arc métallique l'extrémité *b* du

premier fil avec l'extrémité a' du second, de telle façon que le courant entrant, par exemple, par a et ressortant par b', parcourt successivement et dans le même sens les deux fils $a\,b$ et $a'\,b'$. Quand on veut avoir un galvanomètre à fil court et gros, on réunit par un arc métallique a et a', et on en fait autant pour b et b'; on fait entrer le courant par les deux bouts réunis (a et a') et ressortir par les deux autres (b et b'), de sorte qu'il parcourt simultanément les deux fils dans le même sens; ce qui revient au même que s'il en parcourait un seul de la même longueur que l'un des deux un diamètre double. Enfin, en ne se servant que de l'un des deux fils, c'est-à-dire en faisant entrer le courant par a et sortir par b, ou bien entrer par a' et sortir par b', on a un galvanomètre à fil court et mince. Le même instrument peut ainsi faire l'office de trois galvanomètres différents, en même temps qu'il sert, conformément au but qu'on s'est proposé en le construisant, de galvanomètre différentiel.

La figure 135 représente un galvanomètre différentiel construit sur de grandes dimensions; l'aiguille aimantée supérieure est recouverte d'une longue lame en baleine mince et légère, taillée en forme de flèche, qui, se mouvant sur un cadran blanc où sont tracées les divisions, rend les indications de l'instrument très-visibles, ce qui est précieux par la démonstration. Ajoutons que c'est à M. Becquerel qu'on doit l'invention du galvanomètre différentiel.

§ 5. Galvanomètres comparables.

Nous avons jusqu'ici envisagé le galvanomètre comme un instrument propre à accuser la présence du courant même le plus faible et à en indiquer la direction; il nous reste à examiner comment il peut en déterminer l'intensité.

Elle peut être appréciée approximativement au moyen de l'amplitude de la déviation, mais elle est loin de lui être proportionnelle, du moins jusqu'à 90°; car de 0° à 20°, on peut sans erreur sensible, ainsi que l'expérience l'a prouvé, admettre cette proportionnalité, de sorte qu'un courant qui produit une

déviation de 12° a une intensité double de celui qui en produit une de 6° et triple de celui qui en produit une de 4°, etc.

Le moyen le plus simple pour déterminer dans un galvanomètre le rapport qui existe entre les forces et les angles de déviation, est d'enrouler autour du châssis plusieurs fils indépendants les uns des autres, placés semblablement par rapport aux aiguilles, de faire passer le courant d'abord par un, ensuite par deux, puis par trois et ainsi de suite; de sorte qu'on agit ainsi sur les aiguilles avec des forces comme 1, comme 2, comme 3, etc. Il faut seulement que les fils soient assez gros et assez peu nombreux pour que le courant, en les traversant tous successivement, n'éprouve pas une diminution sensible d'intensité par l'effet de leur résistance de conductibilité. C'est en opérant ainsi qu'on s'assure que, déjà avant 20° et à plus forte raison au delà, les déviations ne sont plus proportionnelles à la force du courant, mais qu'elles sont proportionnellement moins considérables.

Deux circonstances s'opposent à ce qu'au delà d'une limite qui ne peut dépasser 20° et qui souvent ne les atteint pas, les intensités des courants soient proportionnelles aux angles de déviation. L'une, c'est que la force déviatrice du globe qui, tendant à ramener le système des aiguilles dans le méridien magnétique, fait équilibre à la force du courant qui l'en éloigne, est proportionnelle, non aux angles, mais au sinus des angles de déviation, et qu'à partir d'à peu près 20°, la différence entre l'arc et son sinus, peu sensible jusque-là, devient trop considérable pour qu'on puisse indifféremment prendre l'un pour l'autre. La seconde circonstance c'est que, dès que l'aiguille ou les deux aiguilles s'écartent du méridien magnétique dans lequel elles se tiennent naturellement et dans lequel on place le châssis mobile pour qu'elles soient parallèles aux fils, leur position par rapport à ces fils n'est plus la même et par conséquent les courants ne doivent plus agir sur elles de la même manière. Il est facile de voir que si dans la position normale, celle où les fils sont parallèles aux aiguilles, la force a toute son intensité, elle n'agit plus, dès qu'il y a déviation du méridien, que par une composante d'autant moindre que l'angle de la déviation est

plus grand. Cette circonstance, dont l'influence est peu sensible pour les premiers degrés de déviation, le devient excessivement dès que cette déviation augmente. M. Peltier avait imaginé, pour y remédier, de substituer à chacune des deux aiguilles du système astatique, deux aiguilles croisées à angle droit dans le même plan. Il résulte de cette disposition que, lorsque les aiguilles parallèles au châssis en sont chassées, les autres tendent à y rentrer, et que l'un des effets compense à peu près l'autre; les indications de cet instrument sont jusqu'à 45° assez exactement proportionnelles aux intensités du courant.

Outre M. Peltier, MM. Becquerel, Nobili et Melloni se sont successivement occupés des moyens de dresser des tables de correspondances entre les déviations de l'aiguille et les intensités relatives correspondantes des courants; ils ont employé, pour cela, des moyens empiriques, tantôt en se servant de la méthode des *différences*, au moyen du galvanomètre différentiel, tantôt de celle des *doubles*, en faisant passer dans les deux fils de l'instrument deux courants parfaitement égaux dirigés dans le même sens. M. Melloni faisait usage d'un procédé différent fondé sur la production des courants électriques par la chaleur, dont nous parlerons dans la partie cinquième consacrée aux sources de l'électricité. M. Poggendorff enfin a proposé, pour graduer le galvanomètre, un moyen fort ingénieux fondé sur l'observation de la déviation, d'abord quand le circuit est dans le méridien magnétique, ensuite quand il fait un angle déterminé avec ce méridien et sur l'emploi de la loi de la proportionnalité des intensités des courants aux sinus des angles de déviation.

Mais tous ces procédés, que je me borne à citer sans m'y arrêter, ont été abandonnés depuis la découverte des galvanomètres, appelés aussi boussoles, des *sinus* et des *tangentes*. Il est vrai que, comme ces deux instruments n'ont qu'une seule aiguille aimantée, ils perdent en sensibilité ce qu'ils gagnent en précision. Ils sont donc essentiellement applicables à la détermination de certaines lois, dans lesquelles on agit sur des courants qu'on peut se procurer aussi intenses que cela est nécessaire.

Le galvanomètre à sinus (fig. 136), dont j'avais déjà décrit le principe en 1824 et que M. Pouillet a exécuté plus tard sous

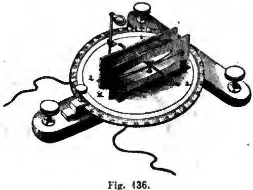


Fig. 136.

une forme un peu différente, consiste en une aiguille de boussole de 12 à 15 centimètres de longueur, munie d'une chape d'agate par laquelle elle repose sur une pointe d'acier placée exactement au milieu d'un cadre en métal étroit et bas, autour duquel est enroulé avec soin un fil ou un ruban de métal recouvert de soie qui fait un plus ou moins grand nombre de circonvolutions, suivant le degré de sensibilité qu'on veut donner à l'appareil. Le multiplicateur et son aiguille sont fixés sur l'alidade mobile d'un cercle divisé; et quand ils sont l'un et l'autre dans le plan du méridien magnétique, l'appareil est au zéro de la division. L'aiguille, par sa position dans l'intérieur du cadre du multiplicateur, à laquelle son axe doit rester parallèle, se prête difficilement à la détermination exacte de sa direction réelle. Pour obtenir cette direction avec précision et d'une manière commode, on ajoute à l'aiguille, perpendiculairement à sa longueur, une lame mince et légère de bois sur laquelle on a tracé une ligne de repère qui permet de juger de la véritable position de l'aiguille elle-même. On est certain qu'elle est exactement parallèle au plan moyen du multiplicateur, quand le repère de l'index dont nous venons de parler tombe sous le fil d'une loupe qui est fixée à la pièce mobile sur laquelle est ajusté le galvanomètre. Pour opérer avec cet instrument, on commence par le placer au zéro de la division, l'aiguille étant bien

parallèle aux fils et en même temps dans le méridien magnétique; puis on fait passer un courant à travers le fil du multiplicateur. L'aiguille est déviée, et on tourne l'alidade qui porte le multiplicateur jusqu'à ce que le fil de la loupe coïncide avec le repère de l'aiguille; la division tracée sur le cercle fixe indique de combien de degrés il a fallu tourner à partir du 0° pour obtenir cette coïncidence; c'est la mesure exacte de la déviation de l'aiguille, c'est-à-dire de l'angle qu'elle forme avec le méridien magnétique. Mais dans cette nouvelle direction, l'aiguille a conservé la même position par rapport aux fils du multiplicateur, c'est-à-dire par rapport au courant qui par conséquent agit sur elle de la même manière. L'amplitude de la déviation de l'aiguille ne doit donc plus dépendre que de l'intensité du courant. Les forces entre lesquelles l'équilibre s'établit et qui par conséquent sont égales, sont ainsi d'une part celle du courant, d'autre part la force directrice de la terre qui tend à ramener l'aiguille au méridien d'où la première l'éloigne. Or, celle-ci étant proportionnelle, comme nous l'avons vu, au sinus de l'angle de déviation, la première, c'est-à-dire l'intensité du courant, l'est aussi. On peut donc, au moyen de cet instrument, en ayant soin d'opérer avec précision dans chaque cas, déterminer avec exactitude les rapports d'intensité qui existent entre les différents courants qu'on transmet à travers le fil du mulplicateur.

On peut, comme on le comprend, donner au galvanomètre à sinus divers degrés de sensibilité, soit en rapprochant ou éloignant les fils de l'aiguille, soit en augmentant ou diminuant le nombre des circonvolutions; on peut même ne faire faire au fil qu'un seul tour. Il est commode d'avoir des multiplicateurs remplissant ces diverses conditions, qu'on peut fixer tous également de la même manière sur l'alidade mobile et dans l'intérieur desquels on place la même aiguille. Il est nécessaire d'apporter tous ses soins à la confection et à l'aimantation de cette aiguille, qui doit être une bonne aiguille de boussole sans points conséquents.

Le galvanomètre à tangente ou *boussole des tangentes* (fig. 137) se compose d'un anneau circulaire de 4 à 5 décimètres de diamè-

tre, muni d'une rainure extérieure de 20 millimètres de largeur au plus, dans laquelle on place un fil, ou mieux encore, un ruban de cuivre recouvert de soie auquel on fait faire un ou plusieurs tours autour du cercle. Les deux extrémités du fil ou du ruban repliées très-près l'une de l'autre se prolongent inférieurement dans le sens du diamètre vertical pour venir plonger chacune dans un godet plein de mercure, afin qu'on puisse opérer ainsi la transmission du courant. Le cercle dont la circonférence est parcourue par le courant est fixé verticalement sur un cercle divisé et horizontal, dont le centre coïncide avec le sien; ce cercle est destiné à mesurer les déviations d'une aiguille aimantée mobile autour du même centre, et suspendue soit au moyen d'un fil de soie sans torsion, soit au moyen d'une chape qui repose sur une pointe. Il faut avoir bien soin que le centre de l'aiguille soit exactement au centre du cercle vertical, de telle façon que la direction de l'aiguille coïncide avec le plan du courant, quand celui-ci est exactement dans le méridien magnétique; position qu'on commence par lui donner quand on veut se servir de l'instrument. Ajoutons qu'il est nécessaire que l'aiguille aimantée soit aussi courte que possible par rapport au rayon du cercle, ce qui n'empêche pas qu'elle soit fortement aimantée; mais comme il importe de pouvoir estimer des fractions de degrés très-petites, on fixe transversalement à l'aiguille aimantée une longue aiguille de cuivre très-légère, dont les extrémités parcourent les divisions du cercle azimutal. Il importe que l'appareil soit construit avec beaucoup de précision; car une erreur de quelques fractions de degrés, surtout quand la déviation est considérable, en entraînerait une très-grande dans l'appréciation de l'intensité. Pour être sûr que cette condition est bien remplie, il faut s'assurer que les déviations indiquées par les deux extrémités de l'ai-



Fig. 137.

guille de cuivre sont toujours et partout égales entre elles, et que, en faisant passer le même courant, tantôt dans une direction, tantôt dans une autre, les déviations qu'on obtient, l'une dans un sens, l'autre dans l'autre, sont bien égales aussi.

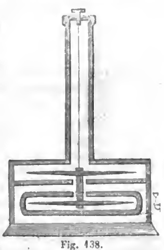
Quand divers courants sont transmis à travers le ruban ou le fil enroulé autour du cercle, ils produisent une déviation de l'aiguille aimantée dont le sens indique leur direction, en même temps que leurs intensités relatives sont proportionnelles aux tangentes des angles de déviation. En effet, il y a pour chaque déviation, quand elle est constante, équilibre ou égalité entre deux forces, dont l'une est la force directrice du magnétisme terrestre, qui est proportionnelle au sinus de l'angle de déviation, et l'autre la force du courant circulaire, qui est proportionnelle au cosinus de ce même angle. C'est en effet ce qu'il est facile de prouver en remarquant que, l'aiguille étant très-petite par rapport au diamètre du courant circulaire, on peut considérer ce dernier comme exerçant son action uniquement sur le centre de l'aiguille, c'est-à-dire, dans la théorie d'Ampère, sur un courant qui est la résultante de tous ceux dont l'assemblage constitue l'aiguille. Or, en supposant que l'angle de déviation que décrit l'aiguille sous l'action d'un courant soit i, la force qui tend à la ramener dans le méridien magnétique et qui fait équilibre à l'action déviatrice du courant, serait $f \sin i$, f étant la force du magnétisme terrestre pour l'angle dont le sinus est 1, c'est-à-dire pour l'angle de 90°. D'un autre côté, si nous nommons F l'action du courant sur l'aiguille, quand celle-ci est placée parallèlement au courant, cette force deviendra $F \cos i$ quand l'aiguille fera un angle i avec la direction du courant, car $F \cos i$ est la composante de F agissant sous l'angle i. $F \cos i$ est donc l'expression de la composante de la force déviatrice du courant sur l'aiguille, quand l'angle de déviation est i; elle est donc par conséquent égale à $f \sin i$, puisqu'elle lui fait équilibre. De $F \cos i = f \sin i$, on tire $F = f \frac{\sin i}{\cos i} = f \operatorname{tang.} i$. Mais f est une quantité constante, du moins dans le lieu où se fait l'observation, puisque c'est la force directrice de

la terre; donc F, soit la force du courant, est bien proportionnelle à la tangente de i ou de l'angle de déviation.

M. Ruhmkorff a réuni en un même instrument le galvanomètre à sinus et celui à tangente; cet instrument peut à volonté remplir l'un ou l'autre service, pourvu qu'on ait soin de changer de place l'aiguille aimantée, et même d'en avoir deux, l'une plus longue qui sert pour le galvanomètre à sinus, l'autre plus courte qui sert pour le galvanomètre à tangente. Il a remarqué, et ma propre expérience confirme sa remarque, que le premier de ces galvanomètres, celui à sinus, fournit des résultats plus exacts que celui à tangente; ce dernier ne donnant pas toujours des déviations de l'aiguille aimantée, dont les tangentes trigonométriques soient rigoureusement proportionnelles aux intensités des courants électriques, à moins que le cercle passant par le courant n'ait de très-grandes dimensions, ce qui diminue alors considérablement la sensibilité de l'instrument.

Plusieurs physiciens, notamment MM. Poggendorff, Weber et Lenz, ont cherché, par des modifications apportées à l'instrument, à rendre les tangentes des déviations proportionnelles aux intensités des courants. M. Péclet s'est proposé d'atteindre le même but. Enfin M. Despretz a réussi à obtenir ce résultat pour de très-forts courants, en introduisant quelques modifications dans la formule et en employant une boussole des tangentes de très-grande dimension. Mais de tous ces perfectionnements, celui qu'a introduit récemment M. Gaugain dans le galvanomètre à tangentes, paraît devoir donner à cet instrument un degré d'exactitude et de sensibilité en même temps, qui est de nature à le rendre très-supérieur aux autres. M. Gaugain a trouvé qu'on pouvait rendre les intensités proportionnelles aux tangentes en plaçant le centre de l'aiguille aimantée au dehors, et à une certaine distance du plan moyen du cercle vertical parcouru par le courant. Pour déterminer cette distance, il a fait construire un galvanomètre à tangentes, dont le cercle peut se mouvoir parallèlement à lui-même et se placer à différentes distances du centre de l'aiguille; il a opéré successivement avec deux cercles différents, l'un de 214 millimètres de diamètre, l'autre de 263, et il a trouvé que le premier devait être placé à 34 millimètres de

distance du centre de l'aiguille, et le second à 66, pour que la différence entre l'intensité véritable et l'intensité mesurée fût nulle. Or, comme 54 est à peu près le quart de 214 et 66 de 263, il semble en résulter que l'on peut construire un galvanomètre des tangentes avec un cercle d'un diamètre quelconque, en ayant soin seulement de placer le cercle à une distance du centre de l'aiguille égale au quart de son diamètre. M. Bravais ayant appliqué les formules générales d'Ampère au cas dont il s'agit, a trouvé par l'analyse la confirmation générale du résultat obtenu par M. Gaugain dans deux cas particuliers, ce qui a permis à ce physicien de construire des galvanomètres à tangentes d'une grande sensibilité. En effet, si l'on enroule suivant la surface d'un cône droit dont le sommet est au centre de l'aiguille aimantée, et dont l'angle est facile à déterminer, un fil métallique couvert de soie, chacun des tours de spire donnera des déviations dont les tangentes seront proportionnelles à l'intensité du courant, et le *multiplicateur conique*, formé par la réunion de toutes les spires, jouira de la même propriété. M. Gaugain s'est assuré de cette proportionnalité en faisant agir successivement sur l'aiguille un, deux, trois et quatre courants égaux et semblablement disposés autour du cône; mode de vérification sur lequel nous reviendrons en nous occupant de la mesure des courants, dans la quatrième partie de ce Traité.


Fig. 138.

Un galvanomètre qui donne encore très-bien le rapport entre les intensités des divers courants qu'il transmet est le *galvanomètre à torsion* de Ritchie (fig. 138). C'est une balance de torsion, dans laquelle l'aiguille aimantée astatique se trouve, quand elle est au 0° de torsion, à la fois dans le méridien magnétique et dans le plan moyen du châssis autour duquel est enroulé un fil de métal recouvert

de soie, de manière à faire un ou plusieurs tours. On ramène par la torsion l'aiguille aimantée à sa position normale quand le courant qui parcourt le fil l'en écarte, de façon qu'elle se trouve toujours et dans le méridien magnétique et dans la même position par rapport aux courants. Il en résulte nécessairement que les intensités des courants sont proportionnelles aux angles de torsion, nécessaires dans chaque cas pour ramener l'aiguille à son point de départ. M. Ritchie a trouvé que l'appareil était plus sensible si on remplaçait le fil métallique de torsion par un fil de verre.

Enfin M. Becquerel a imaginé, pour obtenir une mesure exacte des courants électriques, de se servir d'un appareil qu'il a nommé la *balance électro-dynamique* (fig. 139). Il consiste en une ba-

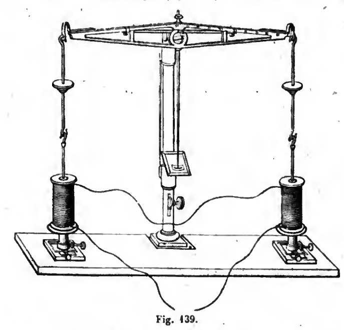


Fig. 139.

lance sensible qui puisse trébucher à une fraction de milligramme. Au-dessous de chacun des plateaux on suspend un barreau d'acier aimanté au moyen d'un fil de soie ; ces deux barreaux doivent avoir environ 3 millimètres de diamètre et

8 centimètres de longueur. Ils sont aimantés à saturation, et on tourne leur pôle nord en bas, afin qu'ils perdent moins facilement leur magnétisme. Une fois en équilibre, les deux barreaux de la balance doivent trébucher au moins à un demimilligramme. On prend deux tubes en verre ou deux bobines; on enroule autour des tubes ou des bobines un fil de métal recouvert de soie, de manière à faire plus ou moins de circonvolutions, comme pour les galvanomètres, suivant le but qu'on se propose. On fixe ces deux bobines verticalement sur de petits plateaux horizontaux mobiles, dans deux directions perpendiculaires entre elles, au moyen de vis de rappel, afin de pouvoir les centrer par rapport à l'axe des barreaux par dessous lesquels on les place. Si le courant ne traverse que l'une des hélices, le barreau et le côté du fléau de la balance avec lequel il est lié s'élève ou s'abaisse suivant la direction de ce courant. On fait passer, pour augmenter l'effet, le même courant à travers le fil de la seconde hélice dans une direction telle que la seconde branche du fléau s'abaisse, si la première s'élève, et réciproquement; en d'autres termes, de façon que le mouvement du fléau s'exécute dans le même sens; les actions que les deux hélices exercent ainsi sur les deux barreaux s'ajoutent nécessairement. Au moyen de poids qu'on place sur le bassin soulevé on rétablit l'équilibre, ce qui ramène les courants et les aimants dans la même position respective; on a donc dans la quantité de poids nécessaire pour rétablir l'équilibre l'expression exacte de l'intensité de chaque courant, ou plutôt on tire, des rapports qui existent entre ces poids, les rapports qui règnent entre les intensités des courants. Ainsi, pour donner un exemple, on a fait passer dans les deux hélices le courant produit par deux lames, l'une de zinc, l'autre de cuivre, de 4 centimètres carrés de surface chacune, et plongeant dans 10 grammes environ d'eau distillée. Les plateaux ont trébuché et il a fallu un poids de $0^{gr},0025$ pour rétablir l'équilibre. Sans rien changer à l'appareil, on a plongé dans l'eau le bout d'un tube humecté d'acide sulfurique, et il a fallu alors un poids de $0^{gr},0355$ pour rétablir l'équilibre, ce qui, en prenant le rapport entre les deux poids, indique que le second courant était qua-

torze fois plus fort que le premier. Nous aurons occasion de revenir plus tard sur plusieurs autres expériences intéressantes, que M. Becquerel a faites avec sa balance électro-magnétique. Ajoutons que cet instrument peut aussi servir de galvanomètre différentiel, pourvu que les deux bobines et les deux aimants soient parfaitement semblables entre eux. Il repose, comme on le voit, sur un principe simple et rigoureux, mais il ne peut être employé pour l'étude des courants de faible intensité, n'étant pas assez sensible.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans parler des modifications que Weber a apportées au galvanomètre, et qui peuvent s'appliquer également à la boussole des tangentes, modifications qui ont rendu ces instruments d'un emploi plus commode et d'une exactitude bien plus grande. Partant du principe qu'il valait mieux avoir des déviations faibles, mesurées avec une grande précision, que de grandes déviations évaluées approximativement, ce physicien s'est servi d'un gros barreau aimanté auquel il a appliqué le système de suspension bifilaire avec un miroir et une lunette qui donne un fort grossissement des divisions réfléchies par le miroir[1]. On peut apprécier ainsi des fractions de degrés très-petites avec une grande exactitude, cas dans lesquels la loi des tangentes est tout à fait rigoureuse, tandis qu'elle n'est qu'approximative pour les angles un peu considérables. Le cadre de l'instrument, autour duquel le fil est enroulé avec soin et de manière que ses tours très-nombreux soient bien isolés par de la résine, est garni intérieurement d'une lame épaisse de cuivre rouge; il en résulte que les oscillations du barreau aimanté qui ont lieu dans l'intérieur de ce cadre sont immédiatement amorties, sans que la déviation définitive soit le moins du monde altérée. Cette influence du cuivre sur un aimant en mouvement, que nous étudierons dans le chapitre suivant, a été heureusement utilisée par M. Weber, car

[1] Ce système de suspension et d'observation est le même que celui que Gauss a appliqué aux observations de magnétisme terrestre, que nous décrirons avec soin dans le chapitre consacré à ce sujet, et que M. Weber lui-même a employé dans la mesure de l'action mutuelle des hélices électro-dynamiques (p. 270 et suiv., *fig.* 120 et 121).

en faisant arriver le barreau très-promptement à sa position définitive, elle abrége et facilite singulièrement les observations rendues souvent très-pénibles par le nombre considérable d'oscillations que fait l'aiguille aimantée avant de se fixer. Le bel instrument de M. Weber a été construit par M. Rumkorff avec toute la précision et la solidité qu'il requiert.

§ 6. Procédés galvanométriques divers.

Quand les courants sont très-forts, on peut, pour les mesurer, se contenter de les faire passer successivement à travers un long conducteur vertical et de faire osciller toujours à la même distance une aiguille d'épreuve. On a, dans le nombre des oscillations exécutées dans un temps donné, une mesure exacte de la force du courant d'après la formule du pendule. On peut aussi, surtout lorsqu'il s'agit d'apprécier les intensités relatives des décharges électriques ou des courants instantanés, se servir de l'aimantation de petites aiguilles opérée par ces décharges, en ayant soin de prendre ces aiguilles aussi semblables que possible. On détermine ensuite le degré d'aimantation que les aiguilles ont acquis en comptant le nombre des oscillations que fait chacune d'elles sous l'influence du magnétisme terrestre. Nous ne nous étendrons pas davantage sur ces moyens de mesurer, qui sont des procédés et non des instruments, et dont, d'ailleurs, la description se trouve naturellement mieux placée quand on est appelé à en faire usage.

Ces procédés présentent toutefois un avantage sur ceux qui servent de base à la construction des galvanomètres, c'est d'être indépendants de la force magnétique des aiguilles ou des barreaux. Cette force peut varier sans qu'on s'en doute, et cependant on la regarde comme constante. Le meilleur appareil serait donc celui dans lequel il n'y aurait d'autre force mise en jeu que celle du courant même qu'on veut mesurer, et peut-être aussi la force magnétique du globe terrestre qu'on peut, sans erreur sensible, regarder comme constante dans le même lieu. Ainsi un galvanomètre multiplicateur, dans lequel, au lieu d'aiguille aimantée, on aurait un petit barreau de fer doux qu'ai-

manterait le courant lui-même qui la ferait dévier, pourrait être utilement employé; il est vrai qu'il serait moins sensible que le galvanomètre ordinaire. On pourrait également, dans la balance électro-magnétique de M. Becquerel, se servir de barreaux de fer doux au lieu de barreaux aimantés. Dans ce cas il ne faudrait employer qu'un bassin, et on mesurerait, par les poids nécessaires pour lui faire équilibre, la force avec laquelle le bassin, au-dessous duquel serait fixée la tige de fer doux, tendrait à baisser, en vertu de l'attraction que le courant transmis à travers l'hélice exerce sur le fer doux. Enfin nous avons déjà indiqué, dans le chapitre consacré à l'aimantation, la possibilité de mesurer l'intensité du courant au moyen de la flexion plus ou moins considérable exercée sur une lame de fer doux, par le courant qu'on fait passer à travers le fil d'une bobine prismatique dans l'intérieur de laquelle est placée la lame. Nous avons également déjà décrit deux appareils fondés sur l'attraction exercée sur le fer doux par un électro-aimant qu'aimante le courant qu'il s'agit de mesurer. Dans l'un (fig. 127), c'est par le nombre des oscillations d'un balancier, dans l'autre (fig. 126) par le ton que rend un petit ressort, qu'on apprécie le nombre de fois que le morceau de fer doux a été attiré par l'électro-aimant, et par conséquent la force du courant, qui est approximativement proportionnelle à ce nombre. Le plus grand obstacle que présente la mise en œuvre de ces différents procédés consiste dans la difficulté qu'on éprouve à trouver du fer assez doux pour perdre la totalité du magnétisme qu'a développé chez lui l'action d'un courant, quand ce courant vient à cesser. Aussi l'appareil qui remplirait le mieux toutes les conditions, s'il était suffisamment sensible, est celui dont Weber s'est servi par mesurer l'action mutuelle de deux hélices électro-dynamiques (p. 270 et suivantes).

§ 7. Graduation des galvanomètres multiplicateurs.

Jusqu'ici nous sommes parvenus à trouver dans le galvanomètre un instrument propre à nous accuser la présence d'un

courant électrique, à nous indiquer sa direction, et à nous fournir des résultats comparables sur son intensité. Mais pour que l'indication de l'instrument ait une signification, il faut toujours avoir en vue deux courants au moins, et se proposer de chercher leur rapport d'intensité. En d'autres termes, l'instrument n'est point gradué, dans ce sens qu'il ne donne pas immédiatement le rapport qui existe entre le courant quelconque avec lequel on agit sur lui et un courant toujours le même, d'une intensité déterminée, qui serve de point de comparaison. On a bien essayé de graduer ainsi les galvanomètres; mais, indépendamment de la difficulté de trouver ce courant parfaitement constant, on a été arrêté par des obstacles inhérents à la nature même de la question. En effet, un galvanomètre gradué de cette manière pourra servir assez exactement à l'appréciation de l'intensité relative des courants provenant d'une source semblable, mais seulement plus ou moins énergique, à celle du courant qui a servi à le graduer. Mais dès qu'il s'agira de courants provenant d'une autre source, ou même simplement engendrés dans d'autres circonstances, l'instrument ne donnera plus de résultats comparables, et risquera même d'en donner d'erronés. Ainsi, si l'on a gradué de la même manière, et en prenant pour terme de comparaison le même courant constant, deux galvanomètres, l'un à fil court et gros, l'autre à fil long et fin, il peut très-bien arriver qu'un courant quelconque, transmis successivement à travers chacun de ces deux galvanomètres, non-seulement paraisse plus faible avec l'un qu'avec l'autre, mais même soit jugé avec l'un d'une intensité moindre, et avec l'autre d'une intensité plus grande que celle du courant qui a servi à la graduation.

Ainsi, le galvanomètre multiplicateur, même le plus parfait, ne doit être considéré que comme un instrument propre à donner les rapports d'intensité entre des courants d'une origine semblable, ou qui, provenant de la même origine, sont soumis à des modifications dont on veut apprécier l'influence sur leur énergie. C'est pourquoi il est indispensable d'avoir plusieurs galvanomètres à fils de différentes longueurs, afin de pouvoir appliquer dans chaque cas celui qui convient le mieux à l'es-

pèce de courant qu'on étudie, du moins autant qu'on peut, *à priori*, en juger, ce qui n'est pas toujours également facile. Nous verrons plus loin, dans le premier chapitre de la quatrième partie, où nous nous occuperons de la propagation des courants électriques, et dans la cinquième, où nous traiterons des sources de l'électricité, les causes de ces différences entre les courants de diverses origines. Nous étudierons les moyens par lesquels on peut cependant, en les ramenant à des conditions aussi semblables que possible, les comparer entre eux, moyens tout à fait indépendants du galvanomètre même qui sert à cette comparaison, mais fondés sur les résistances de conductibilité que la loi de Ohm permet d'apprécier avec la plus grande exactitude.

Si nous avions besoin de justifier la longueur des détails dans lesquels nous sommes entrés sur les galvanomètres multiplicateurs, il nous suffirait d'énumérer les services que cet instrument a rendus à la science de l'électricité. Nous nous contenterons d'en appeler à tous les chapitres qui suivront celui-ci; il n'en est pas un où ne se trouvent une ou plusieurs applications du galvanomètre. Ajoutons donc seulement encore que les galvanomètres dont nous ferons le plus fréquemment usage sont le galvanomètre à deux aiguilles de Nobili, à fil plus ou moins long, suivant la nature des courants; celui de Dubois-Reymond pour les courants provenant de corps peu conducteurs; le galvanomètre différentiel de Becquerel, pour comparer l'intensité relative de deux courants; et enfin les galvanomètres à sinus et à tangentes pour mesurer exactement la force des courants. Quelquefois aussi nous nous servirons d'un simple galvanomètre à une seule aiguille, à fil très-gros et très-court, lorsqu'il s'agira de courants d'une grande intensité ou provenant d'une source très-conductrice [1].

[1] Les principaux travaux relatifs au sujet traité dans ce chapitre, sont :
Schweiger. — Galvanomètre multiplicateur. *Bibl. univ.* T. XVI (1821), p. 197.
Nobili. — *Idem*. *Bibl. univ.* T. XXIX (1825), p. 119, t. XXVII, (1828), p. 10. — *Ann. de ch. et de phys.* T. 43 (1830), p. 146.
Becquerel. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXIV (1823), p. 337 et t. XXXII, (1829), p. 420. — Balance électro-dynamique. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LXVI (1837), p. 84.

De la Rive. — Galvanomètre à sinus. — *Mémoire de la soc. de Phys. et d'Hist. Nat. de Genève.* T. III (1re partie), p. 117 (1824).

Pouillet. — Gavanomètre à sinus et à tangente. Compte rendu de l'Ac. des sc., t. xx, p. et traité de Phys. et de Météorologie.

Poggendorff. — Galvanomètres comparables. *Ann. der physik.* T. LVII, et *Ann. de ch. et de phys.* (3e série). T. VIII (1843), p. 115.

Lenz. — Galvanomètres comparables. — *Ann. der physik.* T. LIX.

Weber. — *Idem.* *Idem.* T. LV.

Despretz. — Galvan. ou boussole des tangentes. — *Compte rendu de l'Ac. des sc.* T. XXXV, p. 449.

Gaugain. — Galvan. ou boussole des tangentes. — *Compte rendu de l'Ac. des sc.* T. XXXVI, p. 191.

Bravais. — *Ann. de ch. et de phys.* (3e série). T. XXXVIII (1853), p. 301.

Ritchie. — Galvanomètre à torsion. *Bibl. univ.* T. XXXXVI, (1831), p. 9.

Melloni. — Galvan. comparables. *Ann. de ch. et de phys.* T. LIII (1833), p. 1.

Peltier. — Galvanomètres comparables. *Ann. de ch. et de phys.* T. LXXI (2839), p. 225.

CHAPITRE V.

INDUCTION ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

§ 1. Magnétisme par rotation.

On doit à M. Arago la première expérience qui a montré que le mouvement est un moyen de développement du magnétisme ou des courants électriques dans tous les corps. Il ne faut point confondre cette action avec celle qu'avait découverte Coulomb, sur laquelle nous reviendrons, savoir que les aimants sont capables d'agir sur tous les corps de la nature de la même manière, à l'intensité près, qu'ils agissent sur le fer. Les phénomènes dont nous nous occupons dans celui-ci sont ceux auxquels donne naissance le mouvement, c'est-à-dire le déplacement de la cause qui agit par rapport au corps sur lequel elle agit. On a nommé *magnétisme par rotation* la forme sous laquelle M. Arago mit en évidence le premier cet ordre de phénomènes.

Ayant fait osciller une aiguille aimantée, librement suspendue dans une cage de cuivre circulaire dont le fond et les rebords étaient très-près de l'aiguille, M. Arago remarqua que les oscillations de l'aiguille diminuaient rapidement de grandeur et cessaient assez vite, comme si le milieu dans lequel elles s'opéraient était devenu plus résistant. Du reste, le voisinage du cuivre n'exerçait d'influence que sur l'amplitude, et non sur la durée des oscillations, qui s'accomplissaient exactement dans le même temps que dans l'air libre [1]. En faisant osciller l'aiguille au-dessus de plans de différente nature et à des distances variables du même plan, M. Arago s'assura que la distance dimi-

[1] C'est cette propriété du cuivre d'amortir les oscillations de l'aiguille aimantée sans influer sur l'intensité du magnétisme, que Weber a utilisée dans son galvanomètre (p. 344).

nuait considérablement l'intensité de l'effet, et que les métaux agissaient avec beaucoup plus d'énergie que le bois, le verre, etc. M. Seebeck, qui répéta l'expérience de M. Arago immédiatement après sa déconverte, obtint des résultats analogues. Ainsi il trouva qui si l'aiguille oscillait au-dessus d'un plan de marbre, il fallait qu'elle accomplît 112 oscillations pour que l'amplitude fût réduite de 45° à 10°, tandis qu'il n'en fallait que 71 au-dessus du zinc et 62 au-dessus du cuivre; malheureusement les expériences de M. Seebeck n'ayant pas été faites avec des plaques de mêmes dimensions et en particnlier de même épaisseur, les résultats n'en sont pas comparables.

Après la première expérience que nous venons de rappeler, M. Arago eut l'idée d'essayer si la plaque qui avait la propriété de diminuer l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée, sans altérer leur durée, n'entraînerait pas l'aiguille avec elle lorsqu'on la mettrait en mouvement; ce qu'il vérifia.

On fixe à un appareil de rotation, tel qu'une table destinée aux expériences sur la force centrifuge, un disque de cuivre de 30 centimètres de diamètre environ, et de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur (fig. 140); on suspend au-dessus et très-près, par

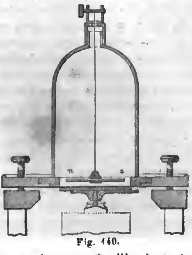


Fig. 140.

un fil de soie sans torsion, une aiguille aimantée, de façon que son point de suspension soit exactement au-dessus du centre du

disque; on a soin d'interposer entre le disque et l'aiguille un écran de verre ou de carton, afin que l'agitation de l'air qui résulte du mouvement imprimé au disque soit sans influence sur l'aiguille. On met le disque en rotation, et l'on voit l'aiguille aimantée se dévier de sa direction normale, dans le sens du mouvement imprimé, et faire avec le méridien magnétique un angle de déviation plus ou moins grand, suivant la vitesse de la rotation. Si le mouvement devient très-accéléré, l'aiguille finit par être entraînée et par tourner avec le disque lui-même.

La force diminue très-rapidement avec la distance de l'aiguille au disque dans un rapport, à ce qu'il paraît, plus grand que le carré; les angles de déviation sont entre certaines limites proportionnels à la vitesse. On diminue considérablement la puissance du disque de cuivre en le sillonnant de fentes dans le sens de ses rayons; ces solutions de continuité, qui n'altèrent point la masse, influent cependant beaucoup sur l'intensité de l'action.

Indépendamment des observations qui précèdent, M. Arago, en analysant la force mise en jeu dans ses expériences, a trouvé que d'*entraînante* ou *tangentielle* au disque qu'elle est, elle peut devenir *perpendiculaire* à son plan et même agir dans le sens même de ses rayons; ce qui fait qu'on peut regarder la force totale comme une résultante de trois composantes, l'une perpendiculaire au rayon du disque, la seconde perpendiculaire au plan du disque, et la troisième parallèle à ses rayons. Nous avons déjà constaté l'existence de la première dans l'expérience fondamentale. Pour constater celle de la seconde, il suffit de placer un aimant verticalement au-dessus et très-près du disque, ce qu'il est facile de faire en le suspendant au bassin d'une balance. Aussitôt que le disque est en mouvement, le bassin est soulevé, ce qui prouve que l'aimant vertical est repoussé par le disque; le poids nécessaire à mettre dans le bassin pour rétablir l'équilibre indique l'énergie de cette répulsion. Quant à la troisième composante, on démontre son existence en plaçant verticalement au-dessus du disque une aiguille mobile (comme celle d'inclinaison) autour d'un axe horizontal, et de façon que cet axe soit perpendiculaire au rayon du disque. Si l'aiguille

est au-dessus du centre, elle n'éprouve aucune action; elle n'en éprouve pas davantage si elle est située au-dessus d'un point plus près du bord que du centre du disque, savoir à une distance du centre égale à peu près aux deux tiers du rayon. Mais entre ce point et le centre, le pôle inférieur de l'aiguille est constamment attiré vers le centre; au delà de ce point, c'est-à-dire entre ce point et le bord, le pôle est attiré vers le bord du disque.

Pendant que M. Arago analysait, comme nous venons de le voir, la force qu'il avait découverte, MM. Babbage et Herschell, Harris, Barlow et d'autres cherchaient à étudier les causes qui peuvent la faire varier d'intensité et la modifier. MM. Babbage et Herschell avaient répété l'expérience de M. Arago en la renversant; ils avaient trouvé que des disques de cuivre ou d'autres substances, librement suspendus au-dessus d'un aimant en fer à cheval mis en rotation, tournaient dans la même direction que l'aimant avec un mouvement d'abord lent, mais dont la rapidité s'accroissait graduellement. L'aimant était disposé de manière à pouvoir recevoir un mouvement rapide de rotation autour de son axe de symétrie placé verticalement, les pôles en haut. Le mouvement du disque changeait de sens avec celui de l'aimant. L'interposition de plaques de verre, de plaques métalliques non magnétiques, ne modifiait nullement les effets; il n'en était pas de même quand les plaques interposées étaient de fer; l'action était alors extrêmement amoindrie, et même entièrement annihilée quand il y en avait deux l'une sur l'autre.

En soumettant à l'expérience des disques de même diamètre, mais de diverse nature, les deux physiciens ont trouvé de grandes différences entre ces disques quant à leur faculté d'être entraînés par l'aimant en rotation, quoique la vitesse du mouvement imprimé et leur distance à l'aimant fussent les mêmes. Ainsi le zinc et le cuivre paraissent posséder à cet égard une énergie quatre fois plus forte que le plomb, et cent fois plus forte que l'antimoine. Mais les disques n'avaient malheureusement pas tous la même épaisseur, ce qui rend les résultats des expériences peu comparables, l'épaisseur exerçant, entre certaines limites, une influence marquée sur l'intensité du phénomène. Il est probable que c'est à cette cause qu'il faut attribuer le peu

de puissance que MM. Babbage et Herschell ont trouvé à l'or. Ils n'ont, d'un autre côté, obtenu aucun effet avec le bois, le verre, la résine, le soufre et l'acide sulfurique.

Ces deux physiciens ont vérifié l'exactitude de l'observation de M. Arago sur l'influence des solutions de continuité, soit partielles, soit totales, dans les masses soumises à l'expérience. Ainsi un léger disque de cuivre suspendu à une distance donnée au-dessus d'un aimant exécutait ses révolutions en 55″. Coupé en huit endroits dans la direction du rayon jusque tout près du centre, il lui fallut dans les mêmes circonstances 121″ pour exécuter le même nombre de révolutions. Mais les parties séparées ayant été ressoudées avec de l'étain, l'effet primitif fut presque entièrement rétabli, de telle façon que le disque pût faire ses six révolutions en 56″, c'est-à-dire à peu près dans le même temps que lorsqu'il n'avait pas été coupé. Ces mêmes effets furent également obtenus avec d'autres métaux employés, soit comme disques, soit comme soudures. Nous verrons bientôt que tous ces résultats, ainsi que les effets eux-mêmes du magnétisme par rotation, s'expliquent très-bien par la présence de courants électriques que détermine dans les disques le voisinage d'un aimant, et dont la circulation est gênée quand il y a des solutions de continuité dans le corps conducteur. Aussi n'obtient-on aucune action quand on fait tourner l'un par rapport à l'autre deux disques quelconques ou un morceau de fer doux ou d'acier non aimanté et un disque de métal. Il faut absolument que l'un des corps en mouvement soit un aimant.

M. Harris, qui a fait un grand nombre d'expériences sur le même sujet, a trouvé, non-seulement de grandes différences entre les corps quant à la faculté qu'ils possèdent d'entraîner l'aiguille, mais aussi quant à la propriété qu'ils ont d'intercepter cette action. Il a reconnu que le fer, et en général les substances magnétiques, ne sont point les seules qui puissent ainsi arrêter l'effet du magnétisme par rotation. Seulement il faut donner une très-grande épaisseur (de 8 à 12 centimètres) aux plaques des substances non-magnétiques, telles que le cuivre, l'argent et le zinc, pour qu'elles puissent, en étant interposées, arrêter l'action d'un aimant en mouvement sur un disque mobile, et

réciproquement. Enfin à la suite de nombreuses expériences, M. Christie à réussi, comme nous le verrons, à déduire de la force avec laquelle différentes substances entraînent l'aiguille aimantée dans leur mouvement de rotation, le pouvoir conducteur de ces substances pour l'électricité.

Mais l'un des faits les plus importants est dû à MM. Ampère et Colladon, qui ont trouvé que dans toutes les expériences du magnétisme par rotation, on pouvait remplacer l'aimant par une hélice à travers laquelle était transmis un courant électrique, établissant ainsi une nouvelle analogie entre un aimant et un assemblage de courants électriques, circulant tous dans le même sens dans des circuits fermés et parallèles entre eux. L'hélice traversée par un fort courant électrique était mobile, et un disque de cuivre en rotation au-dessous d'elle l'entraînait avec lui comme il aurait entraîné une aiguille aimantée.

Des expériences assez nombreuses ont été encore faites avec des disques de fer et d'acier et des sphères de fer pleines et creuses. Quand le fer est très-doux, les résultats sont assez semblables à ceux qu'on obtient avec d'autres métaux; ils sont seulement plus énergiques; mais un disque d'acier ne produit aucun effet appréciable sur l'aiguille aimantée, qui, après quelques oscillations irrégulières, se maintient dans sa position d'équilibre. M. de Haldat, à qui l'on doit ces observations, en conclut que la force d'entraînement est pour les corps magnétiques en raison inverse de la force coercitive; nous verrons plus loin que cette conclusion ne peut être admise, le phénomène étant, non un phénomène magnétique proprement dit, mais un phénomène électrique.

M. Barlow a étudié en détail l'influence qu'exerce une sphère de fer en mouvement sur une aiguille aimantée. Il avait soin de neutraliser, par le voisinage d'un aimant fixe convenablement disposé, l'influence du magnétisme terrestre sur cette aiguille. Celle-ci était placée, tantôt tangentiellement à la sphère de fer, tantôt parallèlement à son axe de rotation, lequel axe lui-même pouvait avoir, par la construction de l'appareil, différentes directions. Suivant le sens dans lequel tournait la sphère, on voyait ou le pôle nord ou le pôle sud de l'aiguille

s'en éloigner; la répulsion exercée sur l'un ou l'autre des deux pôles dépendait aussi de la partie de la sphère de fer vers laquelle était placée l'aiguille; en d'autres termes, le sens de la déviation changeait pour l'aiguille suivant qu'elle était placée au sud ou au nord de la sphère en mouvement. Tous ces effets tiennent évidemment à l'influence combinée qu'exercent sur le globe de fer, et le magnétisme terrestre, et celui de l'aiguille aimantée placée dans son voisinage. Il aurait été curieux de constater l'influence de la première cause seulement, en remplaçant l'aiguille aimantée par une aiguille de fer doux.

Un point très-important qu'a établi M. Barlow, c'est la grande différence dans l'action qu'exerce une sphère de fer suivant qu'elle est pleine ou creuse. Cette différence est complétement nulle quand le globe et l'aiguille aimantée sont en repos, ce qui vient de ce que, comme nous l'avons dit, la force magnétique ordinaire est tout entière concentrée à la surface; mais dès qu'il y a mouvement, il n'en est plus de même. Ainsi dans les mêmes circonstances et en se servant de la même aiguille, un boulet de fer solide faisant 640 tours par minute, pesant 34 kilogrammes et de 20 centimètres de diamètre environ, déterminait une déviation constante de 28° 24', tandis qu'un boulet creux du même diamètre, mais ayant un poids moitié moindre, ne déterminait qu'une déviation de 15° 5'. Ces deux nombres sont la moyenne de plusieurs expériences faites avec beaucoup de soin.

M. Poisson, qui avait déjà soumis à l'analyse mathématique les travaux de Coulomb sur le magnétisme, a cherché à rendre compte par la même théorie des phénomènes du magnétisme par rotation. Attribuant tous les phénomènes magnétiques à deux fluides impondérables soumis aux lois générales de l'équilibre et du mouvement, qui s'attirent et se repoussent en raison inverse du carré de la distance, il établit que la grande différence qui existe entre ces fluides et ceux auxquels sont dues les actions électriques, c'est que les derniers peuvent passer d'une molécule à l'autre, tandis que les fluides magnétiques n'éprouvent dans l'aimantation que des déplacements très-faibles et inappréciables directement. M. Poisson

appelle *éléments magnétiques* ces petites portions des corps dans lesquelles les fluides magnétiques sud et nord peuvent se mouvoir et qui sont séparées les unes des autres par des intervalles imperméables au magnétisme. Tous les corps sont susceptibles d'avoir leur magnétisme naturel décomposé, mais plus ou moins facilement, suivant leur force coercitive ; c'est à cette force, qui est insensible dans quelques corps, que M. Poisson attribue la différence qui existe entre eux quant à l'action qu'ils exercent suivant qu'ils sont en repos ou en mouvement. A l'état de repos, les corps dont la force coercitive est nulle ne doivent pas exercer d'action sensible sur l'aiguille aimantée ou du moins n'en doivent exercer qu'une très-faible ; mais à l'état de mouvement, le calcul démontre qu'il n'en est plus de même. M. Poisson est même parvenu à déterminer dans ce cas, *à priori*, l'existence des trois composantes que M. Arago avait trouvées par expérience.

La théorie qui sert de base aux calculs de M. Poisson a été renversée par les découvertes subséquentes de M. Faraday, qui donnent une explication toute différente des phénomènes du magnétisme par rotation. Aussi nous ne nous y arrêtons pas davantage, tout en remarquant que l'analyse mathématique, au moyen de laquelle cette théorie a été développée, peut être encore utilement consultée par ceux qui, en se fondant sur des hypothèses autres que celles qui servent de point de départ à M. Poisson, voudraient les soumettre à l'épreuve du calcul. Nous passons donc maintenant aux phénomènes d'induction dont Faraday enrichit la science en 1832 et dans lesquels, comme nous le verrons, rentrent naturellement ceux du magnétisme par rotation.

§ 2. Induction produite par les courants électriques et par le magnétisme.

En 1832, Faraday découvrit qu'un courant électrique ou un aimant peuvent développer à distance par influence dans un fil conducteur des courants électriques, de la même manière qu'un corps chargé d'électricité statique électrise par influence

un conducteur isolé. Voici comment on obtient ce résultat remarquable.

On enroule autour d'un cylindre de bois deux fils de métal recouverts de soie de manière à en faire deux hélices parfaitement semblables, et dont les spires soient parallèles et aussi rapprochées que possible (fig. 141). On fait communiquer les deux

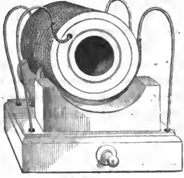


Fig. 141.

bouts de l'un des fils avec ceux d'un galvanomètre, et les deux bouts de l'autre avec les deux pôles d'une pile. Au moment où l'on établit cette dernière communication, la première ayant été établie préalablement, on voit l'aiguille du galvanomètre se dévier; mais cette déviation cesse aussitôt, lors même que le courant de la pile continue à circuler. Dès qu'on interrompt ce courant, l'aiguille du galvanomètre éprouve une seconde fois une déviation également subite et non permanente; mais cette déviation a lieu dans un sens contraire à celui dans lequel avait lieu la première. Ainsi le courant voltaïque qui traverse l'un des fils détermine dans l'autre un courant instantané à l'instant où il commence à passer, et en détermine un second à l'instant où il cesse de passer. Ces deux courants sont dits *courants induits* et le courant de la pile courant *inducteur ;* les courants induits sont, comme on le voit, instantanés; ajoutons encore que le premier a une direction contraire à celle du courant inducteur, et le second une direction semblable.

L'expérience peut se faire sous une autre forme : on enroule autour d'un tube en bois ou en verre un seul fil de mé-

tal recouvert de soie, dont les deux bouts communiquent avec les extrémités du fil d'un galvanomètre; puis on introduit subitement dans le tube un cylindre électro-dynamique, c'est-à-dire une hélice traversée par un courant électrique; et on le retire ensuite de même. Au moment de l'introduction, on obtient dans l'hélice extérieure un courant d'induction dirigé en sens contraire du courant du cylindre électro-dynamique; au moment où l'on retire le cylindre, on obtient un second courant induit dirigé dans le même sens que le sien. Pour que ces deux courants soient sensibles, il faut introduire et retirer très-brusquement le cylindre électro-dynamique. Cette expérience, comme il est facile de le voir, revient au même que la précédente; dans celle-ci on a l'avantage de créer et de détruire instantanément, en fermant et en ouvrant le circuit, le cylindre électro-dynamique, tandis que dans la seconde on l'introduit et on le retire, opération qui ne peut pas s'exécuter avec autant de rapidité; nous verrons plus tard qu'il en résulte une différence dans les courants induits, ceux qui sont produits suivant le dernier mode ayant une durée quelque peu sensible, tandis que ceux qui sont produits suivant le premier mode sont tout à fait instantanés.

Quoi qu'il en soit, les deux expériences prouvent également que, lorsqu'on approche brusquement d'une partie d'un conducteur formant un circuit fermé un conducteur traversé par un courant, on détermine dans le premier un courant instantané dirigé dans un sens contraire à celui du courant qu'on approche, et que, lorsqu'on l'en éloigne, on détermine un second courant instantané dirigé dans le même sens que le courant qu'on éloigne.

L'analogie qui existe entre les propriétés des aimants et celles des cylindres électro-dynamiques fit supposer à Faraday qu'on obtiendrait les mêmes résultats en introduisant, dans l'intérieur de l'hélice creuse de la seconde expérience, un aimant au lieu d'un cylindre électro-dynamique. C'est en effet ce qui arriva. On peut employer pour cette expérience la double hélice (fig. 141), en unissant les deux fils par leurs bouts correspondants, ou en ne se servant, si l'on préfère, que de l'un des deux.

On détermine dans le fil de l'hélice, en y introduisant un aimant, un courant instantané dirigé en sens contraire de ceux qui constituent l'aimant dans la théorie d'Ampère, on en détermine un autre également instantané, mais dirigé dans le même sens que ceux de l'aimant, au moment où on le retire. Ces deux courants induits sont, lorsque le barreau aimanté est passablement énergique, bien plus intenses que ceux qui sont produits par des courants inducteurs. Pour augmenter leur force, il faut introduire et retirer l'aimant aussi brusquement que possible. On peut également employer un autre procédé plus commode et plus sûr. Il consiste à introduire un cylindre de fer bien doux dans l'intérieur d'une hélice, dont les deux bouts communiquent avec le galvanomètre. Au moyen d'un aimant en fer à cheval ou avec les pôles opposés de deux barreaux aimantés, on aimante brusquement le fer doux; aussitôt on obtient le premier courant induit; c'est en effet comme si l'on avait introduit un barreau aimanté dans l'intérieur de l'hélice. On enlève l'aimant en fer à cheval ou les barreaux aimantés; aussitôt le cylindre de fer doux est désaimanté, et le second courant d'induction paraît; c'est comme si on avait enlevé de l'intérieur de l'hélice le barreau aimanté.

Enfin on peut, en faisant l'expérience avec la double hélice suivant le mode indiqué le premier, mais en introduisant dans son intérieur un cylindre de fer doux, obtenir un effet encore plus considérable. En effet, le courant qui traverse une des hélices non-seulement détermine, au moment où il est établi, un courant d'induction dans l'autre, mais en même temps aimante le fer doux, qui par cela même en détermine aussi un dans le même sens et bien plus fort. De même, quand le courant cesse de passer, le fer doux étant désaimanté, il y a développement d'un second courant induit qui s'ajoute également à celui qui résulte de la suppression du courant inducteur.

Une question assez difficile à résoudre se présente ici, c'est de savoir quel est l'état du fil conducteur induit pendant qu'il est sous l'influence du courant inducteur ou de l'aimant. Il semblerait que ce n'est pas un état naturel, puisqu'au moment où l'influence cesse, le fil donne naissance à un courant en re-

passant à l'état naturel; d'un autre côté le fil, pendant la durée de cette influence, ne manifeste aucun courant, aucune propriété particulière, ni électrique, ni magnétique, ni d'un autre genre quelconque. Faraday avait nommé *électro-tonique* cet état particulier. Il semble avoir été amené plus tard par de nouvelles recherches à renoncer à cette supposition d'un état électro-tonique dans le fil, et à admettre que le second courant induit est dû, comme le premier, à une action particulière et immédiate, et n'est pas simplement l'effet du retour du fil à son état naturel, état qui n'a pas cessé d'exister. Nous reviendrons sur cette question délicate, à la fin de ce chapitre, dans un paragraphe consacré à quelques considérations générales sur l'induction.

L'intensité des courants induits dépend de plusieurs circonstances, d'abord de la longueur et du diamètre des fils des hélices, ensuite de l'énergie du courant inducteur ou de la force de l'aimant. On ne peut donner aucune règle précise sur ces divers points. En général, il y a de l'avantage à prendre des fils très-longs et même à ajouter bout à bout plusieurs hélices l'une à la suite de l'autre; mais alors il faut, si ce n'est pas avec un aimant qu'on opère l'induction, employer un courant inducteur provenant d'une pile d'un grand nombre de couples. Au reste, ces données varient avec la nature des effets, et par conséquent avec celle des conducteurs que sont appelés à traverser les courants induits, et même avec la longueur et le diamètre du fil du galvanomètre dont on fait usage pour percevoir ces courants.

Jusqu'ici, pour produire les phénomènes d'induction par les courants électriques, nous avons fait usage de deux conducteurs, l'un destiné à conduire le courant inducteur, l'autre dans lequel se développe le courant induit sous l'influence du premier. L'expérience a montré que le phénomène de l'induction peut se manifester avec un seul conducteur dans lequel, à la fois, on transmet le courant inducteur et on perçoit le courant induit; c'est cette forme particulière d'induction qu'on nomme induction d'un courant sur lui-même. Déjà, en 1832, M. Henry de Princeton, en Amérique, avait observé que, lorsqu'on réunit les pôles d'une petite batterie par un fil de cuivre au moyen de

deux capsules remplies de mercure, on obtient une étincelle brillante au moment où l'on rompt le circuit en soulevant hors du mercure l'un des bouts du fil de cuivre, mais seulement si ce fil a une longueur de 10 à 13 mètres; s'il n'a que 30 à 40 centimètres de longueur, il n'y a pas d'étincelle. On augmente beaucoup l'effet en roulant le fil de cuivre en forme d'hélice. M. Jenkins avait également remarqué de son côté que, quand on réunit les deux plaques d'un simple électro-moteur, c'est-à-dire d'un simple couple, au moyen d'un fil tourné en hélice autour d'un cylindre de fer doux, on éprouve une secousse chaque fois qu'on interrompt le circuit lorsqu'on tient les deux extrémités du fil, une dans chaque main; on observe en même temps une étincelle brillante au point où le circuit est rompu. On n'obtient aucun effet dans les mêmes circonstances si l'on se sert, pour établir la communication entre les deux plaques du couple, d'un simple fil de cuivre.

Faraday, à la suite d'une longue étude expérimentale de ce point particulier, est arrivé à montrer qu'au moment où l'on interrompt le circuit d'un seul couple formé par un long fil de cuivre, il se produit dans ce fil un *extra-courant* qu'on peut percevoir directement, en soudant à chacun des bouts du fil un appendice, soit une plaque de cuivre, et en réunissant ces deux plaques par divers conducteurs. Un fil fin de platine est rougi et fondu, l'eau est décomposée, l'aiguille aimantée est déviée au moyen du courant transmis entre les deux appendices. Si le conducteur qui les réunit est imparfait, alors l'étincelle est très-brillante au point où l'on interrompt le circuit; elle est par contre nulle s'il est bon; c'est que, dans le premier cas, l'extra-courant développé dans le long fil qui unit les pôles de la pile achève son circuit à travers la pile elle-même, puisqu'il ne peut passer ailleurs, tandis que, dans le second, il l'achève à travers le corps qui unit les deux appendices, vu que ce corps se trouve être un bon conducteur. Cet extra-courant peut donner naissance à une étincelle entre les deux appendices quand on les approche jusqu'au contact l'un près de l'autre; si on les tient dans ses mains, c'est une commotion qu'on éprouve.

L'énergie de l'extra-courant est beaucoup plus prononcée quand le fil qui unit les deux pôles de la pile est enroulé en forme d'hélice, et surtout quand cette hélice contient intérieurement un cylindre de fer doux. Cette circonstance, jointe à d'autres encore, est une preuve que cet extra-courant est bien un courant d'induction, avec cette seule différence, qu'il est développé dans le même conducteur qui transmet le courant induit. L'action mutuelle des spirales les unes sur les autres, dont chacune sert à la fois de corps inducteur et de corps induit, l'influence du fer doux qui, aimanté par le courant inducteur, augmente ainsi l'intensité du courant induit, sont tout à fait d'accord avec toutes les conditions essentielles de l'induction, aussi bien que la direction même de l'extra-courant, qu'on peut apprécier, soit par la décomposition chimique, soit par l'effet galvanométrique. Cette direction, en effet, est telle, que dans le circuit formé par le long fil qui unit les plaques du couple et par le conducteur qui réunit les deux appendices, le courant va dans le long fil dans le même sens suivant lequel cheminait le courant du couple lui-même. On ne doit pas oublier que le courant induit dont il s'agit ici est celui qui se produit au moment où le circuit est interrompu, et non pas au moment où il est établi; or, le second courant est toujours dirigé dans le même sens que le courant inducteur. Quant au premier courant induit, il ne peut être perçu, puisqu'il circule dans le même circuit qui transmet le courant même du couple, et qu'il ne peut se développer qu'autant que ce courant est établi et que par conséquent le circuit est fermé. Mais comme il va en sens contraire, il diminue un instant l'intensité du courant primitif; nous verrons plus tard que cette diminution peut devenir sensible, et accuser ainsi d'une manière certaine l'existence même du premier courant induit.

Un courant inducteur ne détermine pas seulement dans le conducteur soumis à son influence un courant induit, mais il peut y déterminer des effets très-prononcés d'électricité statique, tels que des étincelles à distance dans l'air, la charge d'un condensateur; de telle sorte que le courant d'induction est transformé entièrement en électricité statique. Ce fait impor-

tant signalé par M. Faraday a été constaté par MM. Masson et Breguet, au moyen d'expériences faites sur une très-grande échelle, et d'autant plus concluantes, que la source d'électricité dont on se servait pour opérer l'induction était un courant ou un aimant, et non de l'électricité de tension. Deux fils de 650 mètres chacun et bien isolés étaient enroulés autour d'une bobine de manière à être juxtaposés l'un à l'autre. L'un des fils était mis dans le circuit d'une pile, l'autre communiquait par ses deux extrémités avec les plateaux d'un électroscope condensateur. Chaque fois qu'on interrompait le courant inducteur au moyen d'un rhéotome, on donnait au condensateur de fortes charges d'électricité, dont le signe était d'accord avec la direction du courant qu'on aurait obtenu dans un galvanomètre. On pouvait même tirer des étincelles des plateaux du condensateur, mais seulement quand on le chargeait avec le courant induit au moment de l'interruption, car celui qui est induit au moment de l'établissement ne donne pas d'étincelles et ne charge le condensateur que faiblement.

Il n'est pas nécessaire, pour avoir des signes de tension électrique, de se servir des deux bouts de la même hélice. Si on a deux hélices, l'une de 1,300 mètres parcourue par le courant inducteur et isolée sur un gâteau de résine, l'autre de 650 mètres placée au-dessus et très-près de la première et suspendue à un fil de soie, de manière à être bien isolée, on éprouve une vive commotion en saisissant l'extrémité du fil de la première hélice et l'extrémité contraire (c'est-à-dire qui se charge d'une électricité contraire) de la seconde. Cette expérience prouve que les deux fils sont, au moment de l'interruption du circuit, dans les mêmes conditions que deux bouteilles de Leyde chargées; il se pourrait, il est vrai, que la soie qui entoure les fils des hélices se chargeât elle-même d'électricité statique qu'elle conserverait à cause de sa faculté isolante, et qu'il y eût là une source d'erreur; cependant l'extra-courant peut également à lui seul donner, avec l'hélice de 1,300 mètres, des effets aussi forts que le courant induit. Il a même produit des étincelles très-vives dans le vide entre deux boules de laiton placées à une distance l'une de l'autre d'abord de 2 millimètres, portée

ensuite jusqu'à 2 centimètres, sans que la lumière cessât d'apparaître. Dans cette expérience, la boule et toute la tige formant le pôle positif de l'extra-courant sont entourées d'une atmosphère violette; la boule négative est entièrement nue; mais il y a entre les deux boules une espèce de flamme rougeâtre dont la boule négative est la base; et de temps à autre on aperçoit, sur cette même boule, une multitude de petits points brillants. La pile qui produisait le courant inducteur était seulement de huit couples de Daniell. Avec le courant induit dans une hélice différente de celle où circule le courant inducteur, on obtient des effets lumineux tout aussi prononcés, ce qui prouve qu'on peut induire un courant dans un fil ouvert, pourvu cependant que les deux extrémités en soient réunies par un conducteur, rôle que joue ici le vide. Du reste, les propriétés de la lumière électrique qu'on obtient au moyen des courants d'induction ressemblent tout à fait à celles de la lumière qui se dégage dans les décharges ordinaires.

Dans toutes ces expériences, MM. Masson et Breguet se servaient d'un rhéotome à roue dentée (fig. 131). M. Abria, au moyen d'un rhéotome à peu près semblable et dont nous donnons la description plus bas, a obtenu des effets lumineux également très-prononcés, mais il a remarqué que la boule ou pointe négative est entourée d'une atmosphère violacée, tandis que de la pointe positive part une flamme rougeâtre qui s'allonge à mesure qu'on écarte la pointe de la boule, mais sans atteindre cette dernière, de sorte qu'il existe un intervalle obscur entre la pointe et la partie supérieure de cette flamme. Cette lueur rougeâtre ne parcourt que la distance entre la boule et la pointe, qui est de 4 à 5 millimètres.

Une manière de produire l'induction que nous n'avons pas encore mentionnée, c'est d'employer le magnétisme terrestre. Faraday le premier, dans ses belles recherches sur l'induction, a démontré, ainsi qu'on devait s'y attendre, qu'on peut développer des courants induits par la force magnétique du globe comme on en développe au moyen d'un aimant ou par l'influence des courants fermés. Voici son expérience fondamentale : on prend un fil de cuivre de 3 mètres de long environ, et

de 1 à 2 millimètres de diamètre; on l'attache par un des bouts à l'une des extrémités du fil d'un galvanomètre multiplicateur et par l'autre bout à l'autre extrémité; puis on lui donne la forme d'un rectangle qu'on place perpendiculairement au méridien magnétique et dont le côté inférieur se trouve interrompu par le fil du galvanomètre. Le fil lui-même est disposé de façon qu'on peut donner au rectangle un mouvement de rotation autour de son côté inférieur, ou, ce qui revient au même, faire décrire au côté supérieur une surface cylindrique autour du côté inférieur. Si l'on fait cheminer ce côté de l'ouest à l'est, l'aiguille du galvanomètre indique la présence d'un courant induit dirigé du sud au nord; si on le fait cheminer de l'est à l'ouest, le courant induit va dans le fil mobile du nord au sud. Le phénomène est le même dans tous les azimuts. Il n'y a qu'un cas dans lequel on n'obtienne aucun effet: c'est lorsque la partie mobile du fil se meut parallèlement à la direction de l'aiguille d'inclinaison; mais pour peu qu'elle soit inclinée par rapport à cette direction, il y a développement d'un courant induit; et quand elle lui est perpendiculaire, ce courant est à son maximum d'intensité. Il n'est pas nécessaire de donner au fil la forme d'un rectangle; on observe les mêmes phénomènes en lui donnant la forme d'une courbe fermée quelconque, dont le plan soit disposé comme l'était celui du rectangle. Plus est longue la partie du fil à laquelle on imprime un mouvement, et plus est grand l'espace qu'on lui fait parcourir, plus est considérable l'effet qu'en éprouve le galvanomètre.

Il résulte évidemment des phénomènes que nous venons de décrire, que le globe terrestre agit pour produire l'induction comme agirait un fort aimant placé dans l'intérieur du globe dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, ou comme une ceinture de courants électriques dirigés de l'est à l'ouest autour de l'équateur magnétique.

Les premiers courants d'induction que Faraday avait obtenus par l'influence du magnétisme terrestre s'étaient manifestés dans une hélice dont le fil communiquait, par ses deux extrémités, avec celles du galvanomètre, et qu'on retournait un plus ou moins grand nombre de fois dans le plan du méridien

magnétique. Un barreau de fer introduit dans l'hélice augmente beaucoup l'intensité de l'effet; alors le courant induit n'est pas dû à l'action directe du magnétisme terrestre, mais à celle du barreau, qui lui-même est aimanté par ce magnétisme.

La facilité avec laquelle le magnétisme terrestre peut développer des courants électriques dans des corps en mouvement conduit à une conséquence qui peut paraître extraordinaire au premier moment, c'est qu'il n'est par une pièce de métal qui, étant mise en mouvement et demeurant en même temps en contact avec d'autres corps conducteurs en repos ou animés de vitesses différentes, ne soit pas cela même traversée par des courants électriques. C'est ce qui doit, en particulier, arriver aux différentes pièces en mouvement d'une machine à vapeur. Faraday a réussi en imprimant simplement un mouvement de rotation à un disque de cuivre horizontal, et par conséquent incliné de près de 70° à l'aiguille d'inclinaison, à obtenir des courants d'induction qui étaient toujours dirigés du centre à la circonférence ou de la circonférence au centre, suivant le sens de la rotation; pour percevoir ces courants, on avait soin de mettre l'une des extrémités du galvanomètre en communication avec l'axe, et l'autre avec la circonférence du disque. Aucun effet n'avait lieu, lorsque le disque tournait dans le plan du méridien magnétique ou dans tout autre plan passant par la ligne d'inclinaison; mais dès que le plan dans lequel il se trouvait était incliné seulement d'un très-petit angle sur cette direction, la rotation donnait immédiatement naissance à un courant qui, pour une vitesse de rotation constante, avait son maximum d'intensité quand cet angle était de 90°. Avec un globe de cuivre disposé de façon que son axe de rotation soit incliné à la direction de l'aiguille d'inclinaison, mais reste dans le plan du méridien magnétique, on obtient, en lui imprimant un mouvement autour de son axe, des courants d'induction qui sont assez énergiques pour exercer immédiatement une déviation sur une aiguille aimantée qu'on en approche, sans que l'intermédiaire d'un galvanomètre soit nécessaire. On a soin de se servir d'une aiguille astatique suspendue à un fil de soie très-fin, et de la placer dans un bocal de verre pour la mettre à

l'abri de l'agitation de l'air. On approche le système astatique du globe en mouvement de telle façon, que l'aiguille supérieure soit dans le plan horizontal qui passe par le centre du globe; si elle est placée à l'est et que le globe se meuve de l'est à l'ouest, son pôle nord se dévie à l'est; il se dévie à l'ouest quand la rotation a lieu de l'ouest à l'est. Les effets ont lieu dans un sens inverse si le système astatique des aiguilles est transporté à l'ouest du globe en mouvement.

Les effets que produit un globe de cuivre mis en rotation sont exactement de même nature que ceux que M. Barlow a obtenus avec un globe de fer placé dans les mêmes circonstances; ce qui prouve que la déviation exercée sur une aiguille aimantée par une sphère de fer en mouvement ne tient pas au magnétisme, mais aux courants d'induction développés par l'influence du magnétisme terrestre; circonstance qui établit, aussi bien dans la cause que dans la nature des effets, une grande différence entre l'action d'un globe de fer en repos et l'action d'un globe de fer en mouvement.

§ 3. Explication par l'induction du magnétisme de rotation.

En voyant le magnétisme terrestre capable de produire par induction des courants continus dans des corps conducteurs en mouvement, quelle que soit leur forme, nous sommes conduits à présumer avec une certitude presque complète que l'action des aimants en peut faire autant, et à trouver ainsi l'explication des phénomènes du magnétisme de rotation, en les rattachant à la production des courants d'induction. C'est encore à Faraday qu'on doit la vérification de cette conséquence. Il a d'abord montré qu'un disque de cuivre mis en rotation autour d'un axe dans un plan quelconque donne naissance à des courants électriques, quand on le fait circuler de façon que son bord passe entre les deux pôles opposés de deux aimants ou d'un aimant en fer à cheval (fig. 142). Le voisinage d'un seul pôle est suffisant; mais l'effet est moins prononcé. L'une des extrémités du galvanomètre qui accuse ce courant communique avec

l'axe du disque et l'autre avec sa circonférence, qu'on a soin d'amalgamer pour rendre le contact plus parfait. Le courant



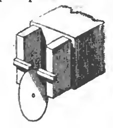


Fig. 142.

produit sur l'aiguille du galvanomètre une déviation permanente, dont le sens et l'intensité dépendent du sens et de la rapidité de la rotation, toutes les autres circonstances restant les mêmes; tant que la rotation s'exécute dans le même sens, le courant conserve la même direction, lors même que le point de la circonférence qu'on touche avec le conducteur est à gauche ou à droite de la partie qui passe près du pôle où est cette partie même. L'intensité diminue seulement à mesure qu'on s'en éloigne. On peut faire communiquer les deux bouts du galvanomètre également avec le bord du disque; et on obtient des courants dont le sens est déterminé par celui des deux bouts qui est le plus près du lieu où sont les pôles de l'aimant. S'ils sont tous deux à la même distance de ce lieu, l'un à gauche, l'autre à droite, le courant est nul, ce qui tient à ce qu'il y a deux courants égaux et contraires qui se neutralisent.

Faraday a obtenu exactement les mêmes effets en remplaçant l'aimant ordinaire par un électro-aimant ou même par une simple hélice traversée par un courant, mais sans noyau de fer intérieurement. Toutes les précautions avaient été prises pour que les résultats ne fussent point influencés par le magnétisme terrestre; il était facile de s'assurer qu'il en était ainsi en constatant qu'il n'y avait plus d'effet dès qu'on éloignait du disque l'aimant, l'électro-aimant ou l'hélice. Le savant physicien anglais a cherché à établir une relation entre le sens des courants qu'il obtient dans ses expériences et la direction des lignes de force magnétique ou courbes magnétiques qui émanent de chacun des pôles de l'aimant, dont on détermine la

force et la position par la distribution de la limaille. Il estime que, tant que le sens du mouvement du disque est le même, les rapports de position du métal avec les résultantes de la force magnétique restant également les mêmes, la direction du courant ne doit pas varier, mais qu'elle doit changer par conséquent si le sens du mouvement devient inverse de ce qu'il était. Il parvient à expliquer de même, en les rattachant au phénomène du mouvement continu de rotation des courants électriques et des aimants les uns autour des autres, les différentes formes sous lesquelles, comme l'a découvert M. Arago, peut se manifester l'action mutuelle des disques et des aimants en mouvement.

Tous les effets qui se rattachent à la production des courants d'induction aussi bien dans des surfaces ou dans des masses métalliques que dans des simples fils me paraissent s'expliquer d'une manière plus simple en les ramenant à la loi primitive de l'induction découverte par Faraday lui-même, et en considérant avec Ampère les aimants comme un assemblage de courants dirigés tous dans le même sens, dans des plans perpendiculaires à l'axe magnétique; considération d'autant mieux justifiée ici qu'un pareil assemblage de courants reproduit tous les mêmes phénomènes qu'on obtient avec un aimant.

Examinons d'abord à ce point de vue l'expérience de Faraday du disque qui tourne sous l'influence d'un aimant dont le pôle est au-dessus ou au-dessous de sa surface. L'un des bouts du galvanomètre est en contact avec l'axe du disque et l'autre avec les points de la circonférence qui viennent tous passer à une même distance du pôle ou des pôles magnétiques. Si ces points n'ont pas encore passé près du pôle, il est évident qu'au moment où ils s'en approchent, il se développe dans la portion du disque à laquelle ils appartiennent un courant d'induction parallèle à celui de la face de l'aimant la plus rapprochée, et dirigé en sens contraire; ce courant, qui chemine le long du rayon du disque, achève son circuit par l'intermédiaire du fil du galvanomètre. Si les points du disque que touche successivement le second bout du galvanomètre sont ceux qui ont déjà passé sous l'influence du pôle, le courant d'induction qui chemine et qui est perçu de la même manière que celui qui

était développé dans le premier cas, se trouve dirigé dans le même sens que le courant situé sur la face de l'aimant près de laquelle vient de passer la portion du disque qu'on considère. Mais cette face de l'aimant a ses courants dirigés en sens contraire des courants de la première face, puisque les courants qui constituent l'aimant circulent autour de sa surface. Il en résulte que le courant d'induction du premier cas ayant une direction contraire à celle des courants de la face de l'aimant vers laquelle il tend, et les courants d'induction du second cas ayant une direction semblable à celle des courants de la face qu'il vient de quitter, ces deux courants marchent dans le même sens, puisque les courants des deux faces ont eux-mêmes un sens opposé[1].

Quand les deux bouts du galvanomètre communiquent l'un et l'autre avec deux portions de la circonférence situées d'un côté opposé du pôle magnétique, alors le courant induit qui est perçu par le fil de l'instrument n'est plus celui qui chemine de la circonférence du disque au centre, mais bien celui qui est développé parallèlement au bord par l'influence des courants de celle des faces de l'aimant parallèles à ce bord, qui en est le plus rapprochée. Or, cette influence donne naissance à deux courants induits dirigés en sens contraire, l'un dans la partie du disque qui tend vers la face de l'aimant, l'autre dans la partie du disque qui s'en éloigne. Ces deux courants parcourent nécessairement le même circuit; circuit formé de la partie du disque comprise entre les deux points de contact de sa circonférence avec les deux bouts du galvanomètre et du fil même de cet instrument. Si les deux courants sont égaux, l'effet est nul, c'est ce qui a lieu quand les deux points touchés sont, de part et d'autre, également distants du point placé sous l'influence de l'aimant. Lorsque les deux points sont inégalement distants, les deux courants ne sont plus égaux, et il y a un effet provenant de leur différence d'intensité; celui qui est développé dans la portion du disque correspondante au point le plus rapproché

[1] Pour être plus bref, j'ai employé le mot *courant* pour *la partie du disque dans laquelle chemine le courant*.

du pôle étant toujours le plus fort, puisqu'il est le plus rapproché de la cause qui produit l'induction.

Les détails dans lesquels nous venons d'entrer pour expliquer les deux expériences de Faraday nous dispensent de donner la description de plusieurs expériences du même genre faites, soit par ce savant lui-même, soit par d'autres. Nous nous bornerons seulement à montrer encore comment les mêmes principes donnent une explication satisfaisante des phénomènes du magnétisme par rotation d'Arago. Ici les courants d'induction que développe l'approche et l'éloignement successifs de l'aimant achèvent leur circuit entier dans le disque lui-même, puisqu'il n'y a aucune communication établie par le fil d'un galvanomètre ou d'aucune autre manière; toutefois c'est naturellement toujours la portion de ces courants qui réside dans la partie du disque la plus voisine de l'aimant, qui détermine l'action attractive ou répulsive. Les trois actions reconnues par Arago ont lieu, l'une perpendiculairement aux rayons du disque, la seconde perpendiculairement au disque lui-même, et la troisième dans le sens même des rayons. La première, celle qui entraîne l'aiguille, provient des courants d'induction que détermine dans le disque lui-même, et parallèlement à son contour, la face inférieure de l'aiguille aimantée; les courants qui vont en sens contraire de ceux de l'aiguille, dans les points du disque qui s'approchent d'elle, la repoussent en même temps qu'elle est attirée par les courants induits développés dans les points du disque qui s'éloignent d'elle, lesquels cheminent dans le même sens que les siens propres. Cette double action entraîne l'aiguille dans le même sens que le disque, ou entraîne le disque dans le même sens que les pôles de l'aimant, si ce sont ceux-ci qui sont mis en mouvement. Le second genre d'action, qui consiste dans la répulsion exercée par le disque en mouvement sur un aimant vertical suspendu au-dessus de lui, provient de la répulsion qui a lieu entre les courants de l'aimant et les courants d'induction dirigés en sens contraire, que la partie du disque qui s'approche de lui acquiert par le fait même qu'elle s'en approche. Une fois la répulsion opérée, les courants induits dans la partie du disque qui s'éloigne ne

peuvent plus, à cause de la distance trop grande, attirer l'aimant, quoiqu'ils cheminent dans le même sens que ses propres courants, tandis que les courants induits dans la partie du disque qui s'approche continuent à le repousser. La conséquence de cette explication, c'est que si l'aimant est suspendu au-dessus du centre même de rotation du disque, il doit rester en repos; c'est effectivement ce que l'expérience confirme.

Le troisième genre d'action a lieu dans le sens du rayon du disque, et s'exerce sur une aiguille verticale mobile autour d'un axe horizontal, dans un plan vertical passant par le centre de rotation du disque. Si l'aiguille est au-dessus de ce centre même, il n'y a aucun effet, comme dans le cas précédent, et l'aiguille conserve sa position verticale; cela tient à la même cause, c'est-à-dire à ce que les courants induits dans des sens contraires sont égaux en nombre et en intensité et agissent aux mêmes distances. Quand l'aiguille est placée, non plus au-dessus, mais à une petite distance du centre, elle est repoussée vers ce centre par les courants induits développés dans la partie extérieure du disque, comme elle était auparavant repoussée verticalement; mais si on l'éloigne davantage du centre, les courants induits dans la partie intérieure du disque ne sont plus sans effet; ils la repoussent aussi, et il existe une position pour laquelle les deux répulsions étant égales, l'aiguille ne prend aucun mouvement. Au delà de cette position, c'est-à-dire plus près de la circonférence, l'aiguille est repoussée loin du centre, parce qu'il y a une plus grande surface totale et par conséquent plus de courants induits répulsifs en dedans qu'au dehors.

Les explications qui précèdent trouvent leur confirmation dans les expériences directes, par lesquelles MM. Nobili et Antinori ont constaté la présence dans le disque des courants induits auxquels nous attribuons les mouvements de l'aiguille aimantée. Ils ont fixé aux deux bouts d'un galvanomètre, deux fils terminés par deux pointes métalliques coniques, assez épaisses pour ne pas fléchir sous la pression des doigts; et ils les ont appliquées comme des sondes sur différents points du disque en mouvement, afin de saisir ainsi les courants qui passent par ces points. Il n'est pas nécessaire, pour assurer les communica-

tions, d'appuyer fortement les pointes contre le disque; on évite, en prenant cette précaution, les courants auxquels donnerait naissance le dégagement de chaleur résultant du frottement sous une pression trop forte. Les résultats de cette espèce de sondage opéré pour diverses positions du disque, par rapport aux aimants, montrent constamment que sur les parties du disque qui entrent sous l'influence magnétique, il se développe un système de courants contraires à ceux de l'aimant, et de l'autre côté un système de courants ayant la même direction que ceux de l'aimant et par conséquent contraires aux premiers. Quant à la distribution même de ces courants et à la forme du circuit qu'ils parcourent sur le disque, on peut, en multipliant les sondages, la déterminer avec plus ou moins de précision; c'est ce qu'ont essayé de faire MM. Nobili et Antinori.

M. Matteucci a repris dernièrement ce point particulier, et les directions des courants qu'il a déterminés sont à peu près celles qu'avaient trouvées Faraday, Nobili et Antinori, mais au lieu de deux systèmes de courants, il en a trouvé quatre; car chaque pôle en a un à sa droite et un à sa gauche.

La méthode de M. Matteucci consiste à faire tourner un disque de cuivre bien aplani dans un plan vertical sous l'influence des deux pôles d'un électro-aimant dont les branches horizontales aboutissent très-près du disque sans le toucher, et à des distances égales de son centre. N et S sont ces deux pôles (fig. 143). Après avoir démontré que le disque est maintenu par induction dans le même état électrique où se trouve une lame métallique qui est en communication avec les deux pôles d'une pile, M. Matteucci y trouve, comme dans la lame, des lignes de *nul-courant* qui sont indiquées sur la figure par les numéros 1, 2, 3, 4 et 5. Ces lignes de courant nul se contournent près des bords de la lame, de manière à les couper toujours normalement. Il est toujours très-facile de les trouver en tenant fixe l'une des extrémités du galvanomètre et en déplaçant l'autre un tant soit peu; car à droite et à gauche de la ligne, les courants obtenus sont en sens contraire. Quant aux courants électriques, soit les filets maximum d'électricité, ils coupent toujours normalement les lignes de courant nul; ils sont représentés

sur la figure par les lignes courbes fermées et ponctuées. La direction de ces courants ne peut être déterminée qu'autant qu'on connaît d'avance les lignes de courant nul.

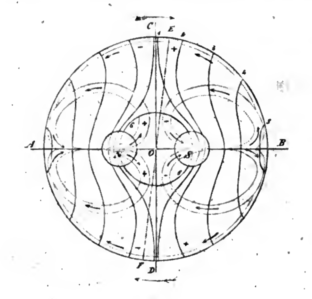


Fig. 143.

Outre les lignes de nul courant déjà indiquées, il en est une désignée dans la figure sous le numéro 6, qui est circulaire et qui sépare des états électriques opposés. M. Matteucci l'appelle ligne neutre et d'*inversion;* elle est analogue à la ligne droite qui, dans le cas d'une lame traversée par un courant électrique, coupe par le milieu la ligne qui joint les pôles de la pile. C'est l'existence de cette ligne neutre ou d'inversion qui porte nécessairement à admettre l'existence de quatre systèmes de courants, c'est-à-dire symétriques deux à deux à côté de chaque pôle. C'est pour n'avoir pas connu cette ligne que les physiciens que nous avons déjà nommés n'ont pas pu bien analyser l'effet du magnétisme de rotation dans le disque d'Arago. La ligne EF ponctuée est encore une ligne neutre, mais qui se déplace par la rotation et proportionnellement

à la rotation. Autour de cette ligne, tout est symétrique et tout se déplace par conséquent avec elle.

Ainsi l'induction détermine sur le disque tournant, en présence de l'aimant, un état d'équilibre dynamique qu'on peut considérer comme fixe dans l'espace et qui est représenté par des lignes *neutres* et d'autres de *nul courant*, qui sont coupées normalement par les filets ou courants électriques. A mesure que la vitesse de rotation du disque augmente, on trouve que ces lignes et le système des courants induits se déplacent dans le sens du mouvement, et proportionnellement à la vitesse de rotation.

M. Matteucci a même réussi, pour montrer l'exactitude de son analyse, à vérifier, au moyen de courants électriques distribués artificiellement comme il admet qu'ils le sont par l'effet de l'induction dans le disque de cuivre, tous les effets des différentes composantes trouvées par M. Arago. Il dispose dans ce but un fil de cuivre recouvert de soie sur un plan de cire, de manière à avoir des circuits semblables à ceux du disque tournant, et il fait passer un courant électrique dans ces circuits en ayant soin de placer convenablement le barreau aimanté. Il faut seulement, pour bien établir la ressemblance, tenir compte du déplacement des circuits dû à la rotation dans le cas du disque.

Il est maintenant facile de comprendre l'influence qu'exercent, dans les phénomènes du magnétisme par rotation, les solutions de continuité du disque; si elles diminuent l'action d'autant plus qu'elles sont plus nombreuses, c'est qu'elles s'opposent à la circulation des courants d'induction, en en modifiant ainsi le nombre et la direction; il suffit, en effet, de remplir les fentes du disque d'un métal conducteur pour rétablir les circuits interrompus, et pour restituer ainsi à l'action la presque totalité de son énergie primitive.

Les différences de force, observées par les physiciens que nous venons de nommer, entre des disques faits de différents métaux, s'expliquent également bien par la différence qui existe entre eux quant à leur pouvoir conducteur, et par conséquent quant au degré de facilité plus ou moins grand qu'ils présentent à la circulation des courants induits. Faraday a confirmé cette

explication en déterminant directement la force des courants induits dans des fils métalliques de diverse nature. Dans ce but, il a roulé ensemble, de manière à en faire une double hélice, deux fils de même longueur et de même diamètre, tous les deux recouverts de soie, mais l'un de cuivre et l'autre de fer. Il a fixé les deux extrémités du cuivre aux deux bouts de l'un des fils du galvanomètre différentiel (fig. 135), et les extrémités du fil de fer aux deux bouts de l'autre fil du même galvanomètre, de telle façon que, si les deux fils sont traversés par des courants ayant la même direction, ils fassent dévier l'aiguille en sens opposé, et que, par conséquent, l'aiguille ne bouge pas lorsque ces courants ont la même intensité. En introduisant dans l'intérieur de l'hélice un aimant cylindrique, il obtint une déviation au galvanomètre, déviation qui fut sensiblement plus forte, mais toujours dans le même sens, quand il eut supprimé la communication de l'hélice du fil de fer avec le fils du galvanomètre, preuve que le courant, avant cette suppression, était la différence entre le courant induit dans le fil de cuivre et le courant induit dans le fil de fer, et que le premier était bien plus fort que le second. Des fils de fer, de zinc, d'étain, de plomb et de cuivre, tirés tous au même diamètre, furent comparés deux à deux de la même manière; seulement, au lieu d'introduire un aimant dans les doubles hélices, Faraday avait placé un cylindre de fer doux qu'il aimantait au moyen d'un fort aimant en fer-à-cheval, ce qui produisait des effets plus marqués et revenait au même, quant au mode d'expérimentation. Les métaux se trouvèrent, à la suite de ces comparaisons, rangés dans l'ordre suivant : le cuivre, le zinc, le fer l'étain et le plomb; c'est exactement l'ordre de leur pouvoir conducteur pour l'électricité; c'est exactement aussi l'ordre de leur pouvoir de rotation magnétique d'après les expériences de Babbage et de Herschell. Celles de Harris donnent aussi des résultats semblables. Le fer seul fait exception; cela tient à ce que, dans les phénomènes du magnétisme par rotation, il agit, non-seulement par ses courants d'induction, mais, en outre, en vertu de ses propriétés magnétiques. C'est encore cette circonstance qui explique la différence que M. de Haldat a trouvée entre l'effet d'un disque

d'acier et celui d'un disque de fer, le premier n'exerçant, avec une vitesse de rotation un peu considérable, qu'un effet à peu près nul, et le second agissant au contraire très-fortement. En effet, les pôles de l'aiguille aimantée déterminent bien sur les parties des disques de fer ou d'acier des pôles opposés qui les entraînent en vertu de l'attraction ordinaire; mais ces pôles, qui aident un moment le mouvement de rotation, entraînés plus loin par la rotation elle-même, agissent sur l'aiguille en sens contraire. S'ils durent peu, comme dans le fer doux, le mouvement de rotation, loin de trouver en eux une opposition, en reçoit une impulsion favorable; s'ils durent davantage, comme sur l'acier, ils retardent l'aiguille et contrarient la rotation. Ainsi la force coercitive n'influe pas directement, comme l'a cru M. de Haldat, sur la force d'entraînement, mais elle agit simplement en retardant dans l'acier la destruction du magnétisme ordinaire.

Quant à l'action d'un ordre très-inférieur et à peine sensible qu'exercent sur l'amplitude des oscillations de l'aiguille des substances non conductrices, il est évident qu'elle ne peut s'expliquer de la même manière que celle des disques métalliques, puisque des courants d'induction ne peuvent s'y établir; elle tient à un autre ordre de phénomènes sur lesquels nous reviendrons.

§ 4. Machines magnéto-électriques.

Nous venons de voir que l'induction magnéto-électrique est une source remarquable d'électricité dynamique; on peut donc en tirer parti pour produire des courants électriques, comme on se sert du frottement dans la machine électrique pour développer l'électricité statique.

La première machine magnéto-électrique a été construite par Faraday; elle consiste en un disque de cuivre mobile dans un plan vertical autour d'un axe horizontal et qu'on fait tourner entre les deux pôles opposés d'un aimant (fig. 144); nous avons vu que, si l'on fait communiquer les deux bouts du galvanomètre, l'un avec l'axe du disque, l'autre avec un point de sa circonférence, la déviation de l'aiguille qui a lieu dans un sens ou

dans l'autre, suivant le sens de la rotation, indique le dégagement d'un courant constant dans le disque. Mais ce courant a

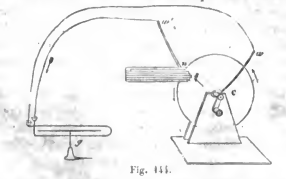


Fig. 144.

fort peu d'intensité; il est incapable de produire des décompositions chimiques, des commotions, etc. Il en est de même des courants d'induction auxquels donne naissance le magnétisme terrestre dans des disques ou des globes métalliques mis en rotation sous son influence.

Pour avoir des courants induits d'une intensité un peu prononcée, il faut les développer dans des fils passablement longs, de telle façon que le conducteur qui réunit les bouts de ces fils soit aussi bon, ou du moins ne soit pas beaucoup moins bon que les fils eux-mêmes; il en résulte que le courant peut les traverser au lieu de rétrograder par le fil même dans lequel a eu lieu l'induction. Le premier artiste qui ait construit une machine sur ce principe est M. Pixii; un gros aimant en fer-à-cheval était mis en rotation au-dessous d'une armure semblable de fer doux, dont les deux branches étaient entourées d'un fil de métal recouvert de soie; chaque fois que les pôles de l'aimant arrivaient sous l'armure et la quittaient, il y avait dans les fils développement de courants induits, et ces courants étaient accusés par les conducteurs qui unissaient les bouts de ces deux fils. M. Pixii avait réussi à produire, au moyen de son appareil, les décompositions chimiques, les commotions, l'étincelle, et même il était parvenu, en isolant les bouts du fils au lieu de les réunir, à charger, au moyen de l'électricité accumulée à chacun d'eux, une bouteille de Leyde et les feuilles d'or d'un électroscope.

Cette machine ingénieuse, mais d'un emploi peu commode, a été bientôt remplacée par l'appareil beaucoup plus portatif de Saxton, modifié et perfectionné ensuite par Clarke. L'appareil de Saxton (fig. 145) se compose d'un fort aimant à cheval fixé horizontalement; une armature en fer doux, ayant la forme d'un fer-à-cheval, et dont chaque branche est entourée d'un fil de métal recouvert de soie, est mise en rotation devant les pôles magnétiques au moyen d'un axe horizontal qui passe entre les branches de l'aimant, et qui, lui-même, est mû au moyen d'une roue. Une corde sans fin, qui passe à la fois autour de la circonférence de la roue et de la gorge d'une poulie fixée à l'axe par

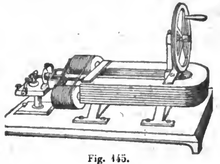


Fig. 145.

son centre, sert à communiquer le mouvement. Les deux branches de l'armature qui est fixée transversalement à l'extrémité de l'axe, se trouvent, pour chaque tour de roue, amenées à passer l'une et l'autre successivement devant les deux pôles de l'aimant. A chaque passage il y a aimantation et désaimantation, et, par conséquent, développement dans le fil ambiant de deux courants induits en sens contraires; d'où résulte qu'il y en a quatre en tout dans chacun des deux fils pour un tour de roue complet. Si l'on compare chaque courant induit dans un des fils au courant induit dans l'autre au même instant, c'est-à-dire à l'instant de l'aimantation ou à l'instant de la désaimantation, on remarquera que ces courants doivent être dirigés en sens contraires, puisque les pôles de l'aimant, à l'influence desquels ils sont dus, sont de nom contraire. Pour qu'ils s'ajoutent, au lieu de se neutraliser, il faut faire communiquer ensemble les deux bouts de chacun des fils d'où le courant semble

sortir, et les deux bouts où il semble entrer à la fois; ces quatre bouts, unis ainsi deux à deux, ne présentent plus que deux extrémités qui sont comme des espèces de pôles qu'on unit par le corps destiné à être mis sur la route des courants induits. On peut également unir ensemble l'une des extrémités d'un fil avec l'extrémité correspondante de l'autre, de façon que les deux fils n'en forment plus qu'un seul parcouru tout entier par chacun des courants induits développés dans l'un et l'autre fil; il faut que, dans le même instant, les deux courants induits simultanés aient la même direction, ce qu'on obtient en choisissant convenablement les deux extrémités qu'on fait communiquer et que nous avons appelées, pour exprimer cette idée, *correspondantes*. Les deux autres extrémités, qu'on n'a pas unies ensemble, forment alors, dans ce cas, les deux pôles. La différence que présentent entre eux ces deux arrangements consiste en ce que, dans le premier, on a deux circuits parallèles, dont les effets s'ajoutent, et que, dans le second, on en a un seul d'une longueur double qui propage un double courant d'induction. Le second circuit est évidemment beaucoup moins conducteur que le premier, puisqu'il se compose d'un seul fil d'une longueur double au lieu de deux fils d'une longueur de moitié; aussi est-il préférable quand les courants d'induction sont destinés à traverser des conducteurs imparfaits; le premier est préférable pour le cas où les corps qui sont mis sur la route de ces courants ont un bon pouvoir conducteur. Il est facile, avec la même machine, de faire communiquer les bouts des deux fils suivant l'un ou l'autre mode, et de pouvoir ainsi, avec un seul et même appareil, obtenir les divers effets qui en exigeraient deux, dont l'un serait à fil court et gros, et l'autre à fil long et mince.

Pour établir les communications entre les deux extrémités des fils, soit pôles, on fait aboutir l'une à une tige fixée sur le prolongement de l'axe, au milieu de l'armure, et qui se meut avec elle, et l'autre à un petit disque métallique vertical fixé par son centre à la même tige qui le traverse, mais dont il est bien isolé au moyen d'un tube de verre qui enveloppe la tige. Le disque plonge constamment, par sa partie inférieure, dans

un petit bain de mercure qui reçoit aussi successivement les deux pointes d'une petite aiguille en laiton ajustée à l'extrémité de la tige, et communiquant métalliquement avec elle. Le mercure établit ainsi, chaque fois que, par l'effet du mouvement de rotation, une des pointes y plonge, une communication métallique entre les deux extrémités ou pôles des fils d'induction. Si l'on a soin de disposer l'aiguille de façon que chacune de ses pointes plonge dans le mercure au moment où l'armure arrive devant les pôles de l'aimant, et qu'elle en sorte au moment où l'armure les quitte, il en résulte que le premier courant d'induction a lieu à l'instant de l'immersion de l'aiguille, et le second à l'instant de son émersion. Aussi cette immersion et cette émersion sont-elles accompagnées chacune d'une étincelle produite par ces deux courants, et il se manifeste par conséquent une série d'étincelles brillantes qui forment comme une lueur continue, tant que le mouvement de rotation est imprimé à l'armure.

Quand on veut faire passer la série de courants induits à travers un conducteur, on supprime l'aiguille fixée transversalement à l'extrémité de l'axe de rotation, et on appuie, contre cette extrémité taillée en creux, le bout terminé en pointe d'une petite tige métallique assujettie solidement à l'une des pièces de l'appareil, et dont l'autre bout plonge dans un godet plein de mercure. On met en communication ce godet et le mercure dans lequel plonge constamment le petit disque au moyen d'un conducteur, et il en résulte que celui-ci sert nécessairement de passage à la série des courants induits. Il faut avoir soin d'amalgamer le fond de la petite cavité creusée à l'extrémité de l'axe, afin que la communication établie entre le fond et la pointe contre laquelle il frotte en tournant soit bien métallique, et par conséquent conductrice.

Les effets des courants induits sont, à quelques différences près, les mêmes que ceux des courants voltaïques. Ainsi ces courants échauffent et font même rougir un fil de platine très-fin mis sur leur route; ils décomposent l'eau acidulée d'un voltamètre; ils font éprouver des commotions très-vives, et même quelquefois très-pénibles à la personne dont les mains tiennent

des conducteurs qui aboutissent, l'un au mercure du petit godet, l'autre au mercure dans lequel plonge la roue. Il faut, pour que l'effet soit plus sensible, que la partie des deux conducteurs tenue entre les mains soit en forme de poignée, et légèrement humectée par de l'eau salée.

Les courants qu'on obtient au moyen de la machine magnéto-électrique diffèrent des courants ordinaires de l'électricité voltaïque sous deux rapports, le premier, c'est qu'ils sont discontinus, le second, c'est qu'ils sont dirigés alternativement en sens contraire. C'est à la première de ces deux circonstances, et non à la seconde, que tient l'intensité remarquable des effets physiologiques, car on peut obtenir le même résultat en rendant discontinu, au moyen d'un rhéotome, un courant voltaïque ordinaire, ce qui produit une série de courants discontinus, il est vrai, comme les courants d'induction, mais tous dirigés dans le même sens. L'influence de la seconde circonstance se fait sentir dans les décompositions chimiques. Comme les courants sont dirigés alternativement dans un sens et alternativement dans l'autre, que, par conséquent, chaque fil sert alternativement de pôle positif et de pôle négatif, il en résulte que les gaz réunis autour de chacun des fils de platine du voltamètre, dans la décomposition de l'eau, sont un mélange d'hydrogène et d'oxygène. Il arrive même que, si la surface du platine en contact avec le liquide est considérable, une grande partie de l'hydrogène et de l'oxygène qui y sont transportés alternativement par l'effet de la décompsition électro-chimique se combinent ensemble pour former de l'eau. Ce phénomène se manifeste surtout quand les courants d'induction se succèdent très-rapidement les uns aux autres, de sorte que l'apparition de l'oxygène et celle de l'hydrogène, sur chacun des deux fils ou sur chacune des deux lames de platine, soient presque simultanées. Cette recomposition fait que la quantité de gaz qui se montre dans le voltamètre est quelquefois très-faible, qu'elle peut même devenir nulle si la recomposition est complète, lors même que les courants ont une grande puissance : cette puissance est alors accusée par l'interposition dans le circuit d'un des galvanomètres calorifiques que nous avons décrits dans la

première partie de cet ouvrage. Un galvanomètre magnétique . donnerait aucune indication, parce qu'étant parcouru par des courants égaux, et alternativement contraires, qui se succèdent très-rapidement, il n'y a pas de raison pour que l'aiguille se dévie dans un sens plutôt que dans un autre.

Dans l'appareil de Clarke (fig. 146) l'aimant est vertical au

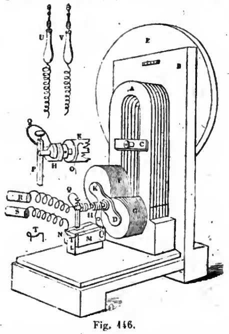


Fig. 146.

lieu d'être horizontal, et l'appareil est disposé de façon qu'on peut se passer de bain de mercure; un petit ressort qui appuie constamment sur un cylindre métallique mis à la place du disque vertical sert à établir la communication; ce cylindre lui-même est traversé par l'axe dont il est isolé, au moyen d'un tube de verre ou simplement par une enveloppe de bois : quant à l'axe, il se termine par un cylindre servant de commutateur ou de pièce de rupture, et qui dans ce but est creusé de manière à présenter des solutions de continuité à sa surface, ou, ce qui vaut mieux, possède une surface alternativement de métal ou de bois. Il en résulte qu'un second ressort, qui appuie constam-

ment contre cette pièce, se trouve, par l'effet de la rotation, en contact, tantôt avec le métal, tantôt avec le bois de la surface du cylindre; ce qui fait que tantôt il communique, tantôt il ne communique pas avec l'une des extrémités du fil induit, tandis que le premier ressort, pressant contre le cylindre métallique qui a remplacé le disque et dont la surface est continue, est toujours en communication avec l'autre extrémité du fil. La disposition que nous venons de décrire a l'avantage de permettre à l'expérimentateur d'avoir des courants induits dirigés tous dans le même sens; il suffit pour cela de combiner les interruptions de la communication entre l'extrémité de l'axe et le ressort qui appuie contre elle, de façon qu'elles aient lieu au moment où l'armure s'approche de l'aimant, ou bien au moment où elle s'en éloigne; dans le premier cas, ce sont les courants induits par l'aimantation de l'armure qu'on exclut, et ceux qui ont lieu au moment de la désaimantation qu'on perçoit; dans le second cas, c'est l'inverse. Une série de courants induits dirigés tous dans le même sens, tels qu'on peut se les procurer par l'appareil que nous venons de décrire, produit exactement les mêmes effets que les courants d'une pile voltaïque, surtout lorsqu'ils se succèdent avec une grande rapidité. Plus le fil dans lequel l'induction s'opère est long et fin, plus les courants qui s'y développent ressemblent, quant à leurs propriétés, aux courants des piles à haute tension. Il arrive cependant qu'à un certain degré de finesse et de longueur des fils, ces courants induits ne peuvent plus produire, non seulement d'effets calorifiques, mais même d'effets chimiques; ils donnent au contraire naissance à des effets physiologiques d'autant plus intenses. Cette influence de la longueur et du diamètre tient à ce que la conductibilité du circuit qui en dépend a une grande part, indépendamment de la cause productrice de l'électricité, dans le degré plus ou moins grand d'intensité des effets du courant électrique. C'est un point que nous traiterons dans la quatrième partie de cet ouvrage.

MM. Palmieri et Linari ont réussi à remplacer dans les machines magnéto-électriques l'action de l'aimant en fer-à-cheval par celle du magnétisme terrestre. Ils avaient d'abord

construit leur machine en disposant sur un même axe horizontal plusieurs cylindres de fer doux, entourés de fils de métal recouverts de soie roulés en hélice; puis, plaçant l'axe dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique, ils lui imprimaient un mouvement de rotation d'où résultait pour les cylindres de fer, par l'effet du magnétisme terrestre, une aimantation alternativement dans un sens et alternativement dans un autre, et par conséquent la production dans les fils ambiants d'une série de courants d'induction exactement semblables, à l'intensité près, à ceux qu'on obtient en faisant passer, dans les machines de Saxton et de Clarke, les armures de fer doux devant les pôles de l'aimant. Une disposition du même genre que celles que nous avons décrites en parlant de ces machines sert à percevoir, dans l'appareil de MM. Palmieri et Linari, les courants d'induction et à les séparer au besoin. Les deux physiciens italiens ont réussi, dans une seconde machine, à développer directement, sans l'intermédiaire du fer doux, des courants induits dans des fils de cuivre par l'action immédiate du magnétisme terrestre. Après divers tâtonnements, ils ont trouvé que la meilleure manière d'obtenir ce résultat consiste à prendre un gros fil de cuivre de 3 à 4 millimètres de diamètre et de plusieurs mètres de longueur, et de l'enrouler autour d'un cadre elliptique ayant un mètre de diamètre dans le sens de son grand axe. On imprime un mouvement de rotation à ce cadre, autour de son axe, en ayant soin de placer l'axe dans une direction presque perpendiculaire à celle du méridien magnétique, et on obtient des courants d'induction qui donnent une forte étincelle et produisent tous les effets calorifiques, chimiques, et physiologiques des machines magnéto-électriques ordinaires. Dans cet appareil, MM. Palmieri et Linari, pour percevoir les courants induits, faisaient communiquer l'une des extrémités du fil avec une simple petite roue métallique plongeant dans un bain de mercure par sa partie inférieure, et l'autre extrémité avec un axe qui traversait la roue tout en en étant isolé. Le conducteur qui réunissait l'extrémité de l'axe et le mercure du bain était traversé par les courants. C'est exactement la même disposition que dans l'appareil de Saxton que nous avons décrit plus haut.

Toutefois, jusqu'à présent, malgré les efforts persévérants de M. Palmieri, les machines magnéto-électriques fondées sur l'emploi du magnétisme terrestre n'ont pu remplacer avec avantage celles dans lesquelles l'influence magnétique émane d'un aimant.

Mais, de toutes les machines magnéto-électriques, les plus puissantes sont celles dans lesquelles on fait usage d'un aimant temporaire, soit électro-aimant. Leur mode de construction diffère essentiellement de celui des machines dans lesquelles l'action provient d'un aimant ordinaire. En effet, il n'est pas nécessaire d'avoir une armure et un électro-aimant, ni par conséquent de donner un mouvement à l'un par rapport à l'autre. Il suffit d'une seule pièce de fer doux (en forme de cylindre par exemple) autour de laquelle on a enroulé deux fils de métal recouverts de soie; on fait passer à travers l'un de ces fils un courant voltaïque, en ayant soin de le rendre discontinu, au moyen d'un rhéotome, et on a dans l'autre une suite de courants induits dirigés alternativement en sens contraire et correspondants au passage et à l'interruption du courant inducteur. Le fil qui conduit le courant inducteur ne doit être ni trop long ni trop fin, vu que le courant provient ordinairement d'un seul couple, et qu'il est nécessaire, pour que l'aimantation du fer doux soit forte, que la résistance du conducteur soit peu considérable. Quant au fil dans lequel se développe le courant induit, ses dimensions dépendent, comme dans les machines que nous avons déjà décrites, de la nature des effets qu'on veut produire. On peut, avec un fil de 30 à 40 mètres de longueur et d'une grande finesse, et en faisant passer à travers un fil ordinaire, le courant seulement d'un couple de Daniell, de 10 à 12 centimètres carrés de surface, obtenir des courants induits tels qu'un homme très-fort ne peut impunément éprouver pendant une ou deux minutes les commotions auxquelles ils donnent naissance.

Pour tous les autres effets chimiques ou calorifiques, on emploie, en général, pour recevoir le courant induit un fil semblable à celui qui conduit le courant inducteur. Les deux fils sont enroulés ou ensemble, ou l'un au-dessus de l'autre, autour de la bobine dans l'intérieur de laquelle on place le fer doux. Celui-ci peut être indifféremment un cylindre plein ou creux;

on a trouvé même quelque avantage à remplacer le cylindre par un faisceau de fils ou mieux de petits barreaux de fer doux isolés les uns des autres par une couche de vernis. Cette circonstance ne permet pas l'établissement de courants d'induction circulant, comme dans le cas d'un seul barreau cylindrique, sur la surface extérieure du cylindre; courants qui diminuent la puissance inductrice exercée sur les fils eux-mêmes. C'est par la même raison qu'il faut éviter de placer, dans l'intérieur de la bobine, un cylindre creux en laiton ou en cuivre; il vaut mieux que le faisceau magnétique soit en contact immédiat avec le bois. Au reste, ces précautions ne sont pas indispensables; elles ne sont vraiment nécessaires que dans certains cas où il s'agit, comme nous le verrons plus loin, d'effets particuliers.

L'une des parties les plus importantes des machines magnéto-électriques à fer doux est le rhéotome. Le plus simple est une roue dentée mue par la main au moyen d'une petite manivelle et communiquant par son axe avec l'un des pôles de la pile pendant que l'autre pôle est en communication par l'intermédiaire du fil inducteur avec une lame élastique qui s'appuie contre les dents de la roue. Chaque fois que, par l'effet du mouvement de rotation, la lame saute d'une dent à l'autre, il y a interruption et rétablissement du circuit dans le fil inducteur, et par conséquent production de deux courants induits successivement en sens contraire dans le fil induit. Quand les deux bouts du fil induit ne sont pas réunis par un conducteur, les courants donnent naissance à une étincelle qui s'échappe entre la lame et la dent et qui provient du courant induit dans le fil inducteur lui-même, lequel ne se montre qu'autant que le premier n'est pas manifesté.

Le rhéotome qui donne naissance aux courants d'induction les plus forts est le rhéotome à mercure que nous avons décrit (fig. 130). On n'a besoin que de deux aiguilles qui, lorsqu'elles plongent dans le mercure, ferment le circuit et l'interrompent quand elles en sortent; elles sont fixées transversalement à un axe qui, lui-même, est mû par un mouvement d'horlogerie dont on règle la vitesse au moyen de volants auxquels s'ajoute l'effet

de la résistance du mercure. Le seul inconvénient que présente ce système, c'est que le mercure est projeté et qu'il s'oxyde assez promptement; il se recouvre alors de petits globules noirs qui nuisent au contact parfait des aiguilles avec le métal liquide et qui, s'élevant au-dessus de sa surface, font souvent communiquer ensemble d'une manière permanente les deux compartiments qui ne doivent avoir d'autre communication que celle qu'établissent, par intervalle, les deux aiguilles qui y plongent. L'appareil ci-joint (fig. 147), construit par M. Bonijol, repré-

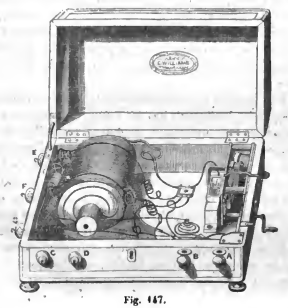


Fig. 147.

sente une machine à induction dans laquelle les deux rhéotomes peuvent être indifféremment employés. Les deux godets A et B sont destinés à recevoir les deux pôles de la pile (ordinairement un seul couple). Du godet B part un conducteur qui aboutit à l'extrémité du fil inducteur de la bobine; du godet A partent deux conducteurs dont l'un aboutit à la roue dentée, l'autre à l'un des compartiments du rhéotome à mercure. Du second compartiment de ce rhéotome aussi bien que de la lame élastique qui appuie contre la roue dentée, part un fil conduc-

teur, et ces deux fils aboutissent à l'autre extrémité du fil inducteur. Veut-on employer le rhéotome à mercure, on fait marcher le mouvement d'horlogerie, et les aiguilles aussitôt exécutent leur immersion et leur émersion ; on a soin, en même temps de soulever la lame élastique, au moyen d'un petit appendice situé à côté de la manivelle, pour qu'elle n'ait aucun point de contact avec la roue dentée, et que le courant ne puisse s'établir que par le rhéotome à mercure. Veut-on employer la roue dentée, on la fait tourner au moyen de la manivelle après avoir remis la lame élastique en contact avec elle; on a soin, en même temps, que les aiguilles de l'autre rhéotome, qui ne sont plus en mouvement, soient disposées dans leur état de repos, de façon à ne pas plonger dans le mercure et à ne pas permettre par conséquent au courant de circuler par cette voie.

Les deux boutons C et D représentent les deux extrémités du fil induit; tout conducteur qui les réunit est traversé par la succession des courants induits. Aux deux autres boutons E et F aboutissent des fils métalliques partant chacun d'une des extrémités du fil inducteur; ces boutons sont destinés à transmettre à travers tout conducteur qui les réunit, les courants induits dans le fil inducteur lui-même; de telle façon qu'on peut, en se servant alternativement des boutons C et D et des boutons E et F, avoir les uns ou les autres; mais on ne peut les faire agir en même temps, les premiers courants n'existant que lorsque les seconds ne sont pas dégagés ainsi que nous l'avons déjà observé. C'est une chose assez remarquable, en effet, que de voir cette dépendance mutuelle des courants induits dans le fil inducteur lui-même et des courants induits dans un autre fil parallèle. Cette circonstance prouve bien que les deux genres de courant tiennent à la même cause et qu'ils ne diffèrent que par le lieu où ils se propagent.

Les effets chimiques et calorifiques qu'on peut produire au moyen de ces courants induits aussi bien au moyen des uns qu'au moyen des autres, sont très-énergiques. On fait rougir un fil de platine, on obtient même un petit arc lumineux entre deux pointes de coke. Quant aux effets chimiques, ils sont très-

prononcés aux premiers instants, mais bientôt les deux gaz dégagés alternativement aux deux fils du voltamètre se recomposant, la puissance chimique paraît, en apparence, diminuée.

Un cinquième bouton G, placé à la suite de E et de F, communique avec un fil métallique qui aboutit au godet B. Voici à quoi il sert, ou ce qui revient au même, voici ce qui se passe quand on l'unit par un conducteur au bouton E. Celui des deux courants induits dans le fil inducteur qui se dégage au moment de la rupture du circuit, se trouve par cette combinaison obligé de parcourir un circuit formé du fil inducteur, du conducteur interposé entre E et G, du fil qui va de G au godet B, de l'appareil voltaïque qui réunit le godet B au godet A, et du fil métallique qui va du godet A au fil inducteur. Ce courant induit est dirigé dans le même sens que le courant inducteur, c'est-à-dire que le courant de l'appareil voltaïque, de sorte que le conducteur placé entre G et E se trouve parcouru à la fois par deux courants : savoir le courant induit et le courant voltaïque. Il en résulte un effet qui est plus que la somme des effets des deux courants isolés, car il paraît que le passage du courant induit à travers l'appareil voltaïque, augmente notablement la puissance de cet appareil. Cette augmentation est surtout sensible, quand l'appareil voltaïque se compose d'un seul couple et que le conducteur interposé entre G et E est un voltamètre. On voit alors le courant d'un couple, incapable par lui-même de décomposer l'eau, produire avec l'addition de son propre courant induit, une décomposition chimique très-énergique. Ce renforcement du courant par lui-même que j'ai découvert en 1843, m'a fait donner le nom de *condensateur électro-chimique* à l'appareil au moyen duquel je l'ai obtenu.

Cet appareil dont la fig. 148 représente la projection horizontale, ainsi que celle du voltamètre et du couple voltaïque, offre une particularité de quelque intérêt, c'est qu'à la place d'une roue dentée ou d'un mouvement d'horlogerie avec aiguilles et mercure, il renferme, pour rendre le courant discontinu, une simple tige métallique élastique munie d'une petite pièce en fer placée tout près du fer doux de la bobine. Quand ce fer doux est aimanté, la petite pièce en fer est atti-

rée, et la tige élastique à laquelle elle est liée est soulevée, ce qui occasionne la rupture du courant inducteur qui, pour

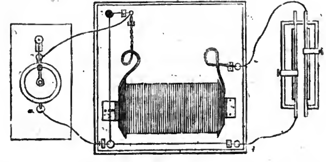


Fig. 148.

parvenir au fil de la bobine, devait traverser la tige et passer dans un petit godet métallique rempli de mercure ou simplement amalgamé, sur le fond duquel reposait l'extrémité de la tige. Cette rupture du circuit détruit l'aimantation du fer doux de la bobine; aussitôt la petite pièce n'étant plus attirée, la tige élastique retombe de manière que son extrémité repose de nouveau sur le fond du godet et le circuit se trouve rétabli. Il en résulte que le courant se trouve interrompu un nombre de fois d'autant plus considérable, qu'il est plus intense, la rapidité avec laquelle les interruptions se succèdent dépendant de la force de l'aimant.

Au lieu d'avoir un appareil distinct, on peut adapter ce genre de rhéotome à la même cassette qui possède déjà les deux autres, comme on peut le voir dans la figure 147. Une petite capsule placée au-dessous de G, et qui communique avec l'un des bouts du fil inducteur, reçoit l'extrémité recourbée d'une tige élastique qui aboutit au godet A et qui, passant près du fer doux de la bobine, est munie dans sa partie la plus voisine de ce fer de la petite pièce également en fer qui, par l'attraction à laquelle elle obéit, soulève la tige et interrompt ainsi le circuit.

Un autre appareil plus simple, construit également par M. Bonijol (fig. 149), présente, sous une autre forme, le même système de rhéotome. On interpose dans le circuit du fil inducteur une tige recourbée, mais fixe AB, et une lame élastique CD.

La lame, en vertu de son élasticité, se met naturellement en contact avec l'extrémité de la tige; les deux surfaces de contact

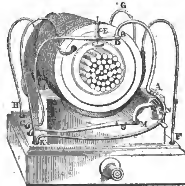


Fig. 149.

sont recouvertes d'un disque de platine afin d'éviter l'oxydation et la destruction rapide du métal. C'est donc entre les deux disques de platine que le contact s'opère et que jaillit l'étincelle s'il y a lieu. La lame élastique est traversée en E par une tige qu'on peut élever ou abaisser de manière à amener son extrémité, qui est un disque horizontal en fer, à la distance convenable du fer doux de la bobine. Il en résulte que l'attraction exercée par ce fer quand il est aimanté sur le disque de fer doux, oblige la lame à se séparer de la tige fixe AB et interrompt ainsi le circuit qui se rétablit aussitôt, l'aimantation venant à cesser dès qu'il est rompu. Le second fil qui aboutit en F et en G et tout conducteur interposé entre F et G reçoivent le courant induit. Les pôles de l'appareil voltaïque doivent communiquer l'un avec une des extrémités H du fil inducteur, l'autre avec l'extrémité C de la lame élastique, la tige fixe AB étant directement mise en communication en K au moyen d'un conducteur avec la seconde extrémité du fil inducteur. De cette manière, le circuit est fermé tant que la tige et la lame demeurent en contact en DB; il est ouvert dès que l'aimantation les sépare.

On peut avec cet appareil comme avec les précédents avoir le courant induit dans le fil inducteur lui-même en mettant H et K en communication directe par l'intermédiaire du conducteur dans lequel on veut transmettre ce courant induit. On peut

également faire passer le courant induit à travers l'appareil voltaïque lui-même, en plaçant le conducteur interposé, qui est, par exemple, un voltamètre, de manière à unir C et K. En effet, le courant induit dans le fil H, K est obligé, pour achever son circuit, au moment où la communication est interrompue en BD, de traverver le couple de H en C pour venir à travers le conducteur interposé de C en K où il trouve le second bout du fil HK.

Le même appareil est muni également en M et N d'un rhéotome à lame élastique et à roue dentée, dont on peut faire usage, pour certaines expériences, où le rhéotome qui chemine par lui-même ne pourrait être mis en activité, ou ne serait pas d'un emploi commode. Tel serait, par exemple, le cas où le courant inducteur agirait sans l'intermédiaire du fer doux de la bobine pour produire un courant induit; il est évident qu'ici il faut un rhéotome qui ait son mode d'action indépendant de l'aimantation.

Il faut, quand on fait usage de ce rhéotome, transporter en J le bout du fil inducteur qui était précédemment en K; parce que c'est en J qu'aboutit le conducteur qui part de la lame élastique destinée à interrompre le circuit en sautant d'une dent à l'autre de la roue N mise en mouvement par la manivelle. Il y a en H, en C, en J et en K de petites cavités creusées dans le bois et pleines de mercure pour faciliter les communications.

Le fer doux placé dans l'intérieur de la bobine n'est pas un seul cylindre, mais un faisceau de petits cylindres recouverts d'une couche isolante de cire.

M. Ruhmkorff a construit récemment sur le même principe l'appareil d'induction le plus puissant qu'on connaisse. Il consiste en une bobine très-longue, de 30 à 40 centimètres, entourée de deux fils roulés en hélice; l'un plus gros destiné à recevoir le courant inducteur, l'autre plus fin dans lequel est produite l'induction. Le rhéotome est fondé également sur l'attraction d'une petite pièce de fer doux par l'électro-aimant de la bobine, attraction qui, en rompant le circuit inducteur, fait cesser l'aimantation et par conséquent rétablit le circuit lui-même. Les fils sont isolés ou au moyen de la résine et un

commutateur permet de changer à volonté le sens des courants inducteurs. Les décharges données par cet appareil sont d'une intensité effrayante, et la lumière que dégage dans le vide le passage de la décharge produite par le fil induit est d'une magnificence remarquable. M. Fizeau a eu l'idée, pour augmenter la puissance de l'appareil, d'y ajouter un condensateur dont les deux lames pliées l'une autour de l'autre, séparées par une couche isolante de taffetas ciré, communiquent chacune à l'un des bouts du fil inducteur, de manière à se charger quand le circuit est interrompu et à se décharger quand il est rétabli, ce qui augmente d'autant la puissance du courant, la décharge ayant la même direction que lui. La figure 150 représente très-exactement ce nouvel appareil de M. Ruhmkorff.

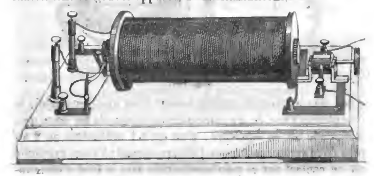


Fig. 150.

Telles sont les principales machines magnéto-électriques dont on fait généralement usage. Si les premières sont d'un emploi plus facile et plus économique puisqu'elles n'exigent qu'un aimant ordinaire, les secondes, qui demandent au moins un couple voltaïque pour aimanter le fer doux, ont l'avantage d'être beaucoup plus puissantes. Les unes et les autres peuvent rendre de grands services à l'électricité; c'est ce que nous verrons quand nous serons appelés à comparer leurs effets à ceux des piles voltaïques et des machines électriques.

Ajoutons encore, avant de terminer ce sujet, que le principe du rhéotome qui chemine par lui-même, peut se démontrer au moyen d'un appareil très-simple que j'ai fait construire dès les premiers temps que j'ai fait usage de ce principe. Cet appareil a, en outre,

l'avantage de pouvoir s'appliquer à un électro-aimant quelconque, de manière à en tirer le courant d'induction produit dans le fil inducteur lui-même (ce qui est indispensable dans ce cas puisqu'il n'y a qu'un fil autour de l'électro-aimant). Ce courant, obligé de traverser le couple qui produit l'aimantation, devient capable de développer des effets électriques qui exigeraient, sans ce mode d'intervention de l'électro-aimant, l'emploi de plusieurs couples. L'appareil se compose (fig. 151)

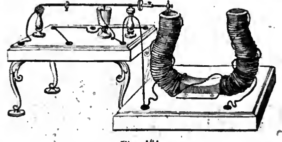


Fig. 151.

d'une tige horizontale mobile autour d'un axe transversal; la tige porte à l'une de ses extrémités un disque de fer doux qui, lorsqu'elle est en équilibre, n'est qu'à 1 millimètre ou 2 au plus de la surface polaire de l'électro-aimant; l'autre extrémité est en contact par sa pointe recourbée avec le fond d'une capsule amalgamée. Cette tige, maintenue en équilibre par un contre-poids, est traversée, dans la moitié de sa longueur, par le courant qui y pénètre au moyen d'une pointe verticale dont l'extrémité inférieure plonge dans une capsule remplie de mercure; aussitôt que la circulation du courant a lieu, l'électro-aimant est aimanté et le disque de fer étant attiré, la tige perd son horizontalité, d'où résulte que le circuit est interrompu au point où il y avait contact entre la capsule et l'extrémité recourbée. Cette interruption faisant cesser l'aimantation, la tige reprend sa position horizontale, le courant recommence aussitôt à circuler, et ainsi de suite. Le courant peut, suivant l'arrangement des conducteurs, être amené à traverser le couple voltaïque lui-même ou être transmis directement à travers tout corps placé sur sa route. Un fait assez curieux, c'est que si le petit

disque de fer doux est placé au-dessus de la partie centrale de la surface polaire de l'électro-aimant, il n'est point attiré, quelque puissant que soit l'électro-aimant. Il faut, pour que l'attraction puisse avoir lieu, et par conséquent pour que l'instrument puisse marcher, que le disque soit près des bords de la surface polaire ou qu'il ait une épaisseur de 2 millimètres au moins; ce qui tient à ce qu'une lame mince de fer doux, quand elle est placée symétriquement par rapport aux forces magnétiques, c'est-à-dire au centre de la surface polaire, acquiert sur ses deux faces deux polarités égales et contraires qui neutralisent toute action extérieure, quelque puissante qu'elle soit.

§ 5. Induction produite par des courants induits.

M. Henry de Princeton est un des premiers physiciens qui se soient occupés de l'induction immédiatement après la découverte de Faraday. Il avait trouvé et étudié avec soin l'induction d'un courant sur lui-même, et il avait imaginé de construire une spirale plate *a* (fig. 152) composée d'un ruban métallique

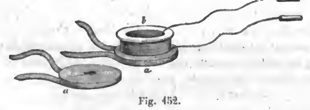


Fig. 152.

recouvert de soie, qui, lorsqu'elle est interposée dans le circuit d'un courant très-faible et incapable de produire la moindre étincelle par lui-même, en donne une très-brillante au moment où l'on rompt le circuit; effet qui est dû au courant induit dans la spirale même qui conduit le courant inducteur. Cette même spirale *a* produit par induction, dans une autre *b* qu'on place au-dessus, un courant qui peut produire de fortes commotions (fig. 152). Mais le point que le physicien américain a le plus particulièrement étudié est le développement des courants d'induction par des courants induits eux-mêmes. Dans ce but il a

fait usage de plusieurs spirales plates (fig. 153); au-dessus et très-près de la première *a* qui conduit le courant d'une pile,



Fig. 153.

soit du *premier ordre*, il en place une seconde *b* semblable, et dont les deux extrémités sont unies à celles d'une troisième *c* placée à quelque distance; au dessus de celle-ci, et très-près d'elle, est une quatrième *d*, dont les extrémités sont de même réunies à celle d'une cinquième *e*, et ainsi de suite. Au moment où l'on interrompt le circuit du premier ordre qui circule dans *a*, il y a dans *b* un courant induit du deuxième ordre, dirigé dans le même sens que le courant de *a*; le courant de *b* traverse *c*, et détermine dans *d* un courant du troisième ordre dirigé en sens contraire, et qui, traversant *e*, détermine dans la spirale placée au-dessus un courant du quatrième ordre dirigé encore dans un sens opposé au sien. Sauf le premier courant induit qui est dû à l'action immédiate du courant de la pile, tous les autres courants induits, provenant de l'action de courants induits eux-mêmes, sont dirigés en sens contraires de leurs courants inducteurs. Cette différence tient à ce qu'un courant induit étant instantané il doit, lorsqu'il agit comme inducteur, déterminer presque en même temps deux courants induits, l'un en sens contraire du sien au moment où il s'établit, l'autre dans le même sens au moment où il cesse. Nous voyons que c'est le premier qui l'emporte sur le second dans le cas actuel. Du reste, la direction de ces divers courants induits est déterminée par l'interposition dans leur circuit, soit du galvanomètre multiplicateur, soit du voltamètre chimique. Toutefois, le procédé employé de préférence par M. Henry est l'emploi d'une spirale magnétisante placée dans le circuit induit d'un ordre quelconque. La figure 153 en représente une placée

dans le circuit du courant du quatrième ordre. Cette spirale indique le sens des courants induits par le sens de l'aimantation imprimée à une petite aiguille d'acier placée dans son intérieur.

M. Abria, dans un travail très-remarquable sur l'induction, a complété les recherches de Henry, principalement en ce qui concerne les courants induits de différents ordres, et l'influence de plusieurs circonstances sur l'intensité et le sens des courants induits en général. Il a d'abord vérifié, en employant aussi la méthode de l'aimantation des aiguilles d'acier, et en poussant les expériences jusqu'aux courants du septième ordre, que l'on a, pour la succession des divers courants induits, la série suivante quand on produit l'induction par la rupture du circuit. Le courant du premier ordre est le courant voltaïque lui-même, à l'instant où il est rompu, et le changement de signe indique le changement de direction du courant :

Courant de la pile, ou du premier ordre. . . +
Courant induit par la rupture du précédent, ou de deuxième ordre. . . . . +
Courant induit par la rupture du précédent, ou de troisième ordre. . . . . —
Courant induit par la rupture du précédent, ou de quatrième ordre. . . . . +
Courant induit par la rupture du précédent, ou de cinquième ordre. . . . . —

Les mêmes phénomènes ont lieu au moment où l'on ferme le circuit voltaïque au lieu de l'ouvrir; mais, comme le courant de deuxième ordre est alors de sens opposé à celui de l'inducteur, les changements de signe ont lieu à partir du courant du deuxième ordre, et on a la série suivante :

Courant de la pile, ou du premier ordre. . . +
Courant induit au moment où le précédent s'établit, ou de deuxième ordre. . . . . . . —
Courant induit au moment où le précédent s'établit, ou de troisième ordre. . . . . . . +
Courant induit au moment où le précédent s'établit, ou de quatrième ordre. . . . . . —

Courant induit au moment où le précédent s'établit, ou de cinquième ordre. . . . . . +

Nous avons distingué les courants induits de différents ordres des deux séries, en disant que chacun de ceux de la première est produit par la *rupture* du précédent, et celui de la seconde par son *établissement*. Mais ces courants, sauf celui du premier ordre, étant tous instantanés, il est impossible de distinguer en fait leur établissement de leur rupture; on doit, pour bien faire, se borner à dire, que des courants instantanés développent par induction des courants également instantanés de sens contraire au leur, tandis que les courants qui ont une durée sensible développent des courants induits dont le sens est contraire au leur, au moment où l'action commence, et le même lorsqu'elle cesse.

La production de ces courants induits d'ordres différents, explique très-bien la diminution qu'éprouve l'induction lorsqu'on approche de la spirale induite une spirale fermée, c'est-à-dire une spirale dont les deux bouts sont unis métalliquement. Il faut seulement considérer que l'on a alors deux spirales fermées, placées dans le voisinage de la même spirale inductrice, savoir, la spirale soumise primitivement à l'induction, et la spirale nouvelle qu'on en approche. Les courants induits dans chacune d'elles par l'action directe de la spirale inductrice sont de même sens, mais chacune détermine dans l'autre un courant de troisième ordre, et on conçoit alors pourquoi, ainsi que l'expérience le démontre, l'effet d'induction est moindre que si la spirale additionnelle n'existait pas; car ce courant de troisième ordre a un sens contraire à celui du deuxième ordre, et diminue par conséquent, dans chaque spirale, l'intensité de ce courant.

M. Abria s'est beaucoup occupé de l'étude de la réaction mutuelle que les spirales exercent ainsi les unes sur les autres; et même il a trouvé que la diminution produite dans chaque spirale induite par l'effet inducteur du courant de l'autre, ne dépend pas seulement de l'intensité de ce dernier, mais encore d'autres circonstances, telles que leur position, soit par rapport au système inducteur, soit les unes par rapport aux autres. Mais de tous les résultats qu'a obtenus M. Abria, le plus impor-

tant, vu qu'on peut en tirer l'explication de la direction alternante des courants de différents ordres, et celle des effets variables des spirales additionnelles, c'est la différence qu'il a réussi à établir entre les courants induits directs et inverses, quant à leur faculté à être transmis à travers un circuit donné, nonobstant que ces courants soient égaux. Il a étudié, à cet effet, les courants d'induction, non-seulement avec le galvanomètre, mais au moyen de leurs effets physiologiques, calorifiques et chimiques. Pour ces deux derniers genres d'effets, et dans quelques cas aussi pour les effets galvanométriques, il s'est servi d'un appareil qui pouvait lui donner une série de courants induits, soit directs, c'est-à-dire qui correspondent à la rupture du circuit voltaïque, soit inverses, c'est-à-dire qui sont développés en fermant ce même circuit.

Cet appareil se compose de deux roues dentées à dents de laiton et à dents de bois, montées sur un même axe, mais isolées; la partie centrale de chaque roue communique avec un ressort d'acier, et la surface avec un ressort en laiton. Les deux roues peuvent tourner à frottement et indépendamment l'une de l'autre sur l'axe commun; elles sont, du reste, parfaitement égales, et l'on conçoit que si l'on fait communiquer les ressorts d'acier et de laiton de l'une d'elles avec les extrémités du circuit principal, ceux de la seconde avec les extrémités du circuit induit, il est facile de disposer les deux roues de manière que le ressort en laiton de la seconde tombe sur une dent de bois, lors de l'établissement du courant voltaïque, et sur une dent de métal lors de sa rupture. On obtient alors dans le circuit induit une série de courants tous de même sens, développés par la rupture du courant voltaïque. On peut ainsi disposer les deux roues de manière à avoir dans le circuit secondaire une série de courants induits, tous de même sens, développés par l'établissement du courant principal. J'ai décrit (fig. 130) un appareil qui peut, au moyen de deux systèmes de deux aiguilles chacun, dont l'un fait partie du circuit inducteur, et l'autre du circuit induit, produire le même effet si l'on a soin de le disposer de façon que les deux aiguilles du circuit induit ne plongent pas dans le mercure quand celles du courant inducteur sortent du

mercure et occasionnent par conséquent ainsi la rupture de ce courant. On a alors une série de courants directs. On peut également se procurer une série de courants inverses en disposant les aiguilles de façon à percevoir les courants induits qui ont lieu au moment de l'établissement du circuit inducteur, et en évitant ceux qui ont lieu à sa rupture.

La figure 154 représente un commutateur fondé sur un

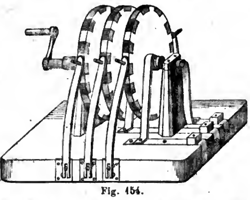


Fig. 154.

principe analogue à celui de M. Abria; il a seulement l'avantage de se prêter à un plus grand nombre de combinaisons possibles. M. Wartmann l'a construit le premier. Il se compose de trois roues de métal qui présentent, à leur circonférence, douze creux remplis par des incrustations en bois dur. Elles sont placées sur un même axe en laiton qu'on met en rotation facilement. Un ressort qui appuie constamment sur cet axe communique ainsi avec la roue la plus éloignée; les deux autres roues ne communiquent pas métalliquement avec l'axe dont elles sont séparées par un anneau d'ivoire revêtu extérieurement d'un cylindre de laiton contre lequel s'appuie un ressort, de sorte qu'il y a trois ressorts pressant contre l'axe dont un seul communique métalliquement avec une des roues; ces trois ressorts peuvent être mis en communication métallique les uns avec les autres. Enfin six ressorts faits de lames de cuivre battu et fixés par des vis au socle de l'instrument appuient, par leur extrémité libre, contre le pourtour de chacune des roues. On peut, à volonté, réduire l'appareil à deux roues

quand on ne veut avoir qu'un des courants induits et à une seule quand on veut se borner à rendre intermittent un courant voltaïque. On doit pouvoir changer le lieu de contact des ressorts qui appuient contre les circonférences des roues et changer la position d'une des roues sur l'axe par rapport aux autres. On a ainsi la faculté de recueillir l'un et l'autre des courants induits, et même, en employant la première roue pour rendre le courant intermittent et chacune des deux autres pour percevoir chacun des deux courants induits, on peut réussir à se procurer la série des courants induits cheminant tous dans le même sens. Il n'y a qu'à, pour cela, disposer convenablement les conducteurs qui servent à unir ensemble les diverses lames élastiques qui appuient contre le pourtour des roues et les ressorts qui pressent contre l'axe.

Il résulte de toutes les observations de M. Abria, faites avec une série de courants induits, que les conséquences auxquelles il était arrivé en étudiant les courants d'induction par la méthode d'aimantation, se trouvent vérifiées en ce qui concerne la marche générale des résultats, par l'étude de leurs effets calorifiques, chimiques ou physiologiques. Si même l'on pouvait mesurer exactement ces derniers effets, il est probable qu'on obtiendrait des valeurs concordantes avec celles que fournissent les autres méthodes.

Quant aux effets galvanométriques, ils diffèrent des autres en ce qu'ils sont égaux dans un circuit secondaire qu'ils correspondent, soit à la rupture, soit à l'établissement du courant, tandis qu'il n'en est point de même des divers autres effets qui sont, au contraire, très-inégaux dans les mêmes circonstances. De même, ces derniers sont influencés par l'action de spirales ou de plaques métalliques, tandis que les premiers ne le sont pas. Enfin les déviations de l'aiguille sont à peine sensibles quand le galvanomètre fait partie d'un circuit d'un ordre supérieur au second. Mais si on fait passer à travers le galvanomètre les deux séries de courants induits dirigés alternativement en sens contraire au moyen de la roue dentée et non plus de façon que le circuit soit constamment fermé, l'aiguille indique généralement, par le sens de sa déviation, une seule série de cou-

rants, celle des courants directs. Cependant on voit bien, par les mouvements quelquefois incertains de l'aiguille, que les courants inverses traversent aussi alternativement avec les directs les fils du galvanomètre; mais ces courants éprouvent une résistance inégale en passant des ressorts sur la roue de laiton, et le galvanomètre indique la série des courants qui a éprouvé le moindre affaiblissement, ou qui ont la plus forte tension. Quelquefois les courants inverses l'emportent, mais après quelques instants l'aiguille du galvanomètre passe de l'autre côté et indique la prédominance des courants directs. Il résulte de là, que les deux courants successifs qui se manifestent dans un circuit induit du second ordre, sont égaux réellement ainsi que l'expérience le montre quand le circuit est parfaitement uniforme; mais que, dès qu'il ne l'est plus complétement, le courant direct prédomine, pouvant mieux traverser un circuit non-uniforme, que ne le peut le courant inverse. Or, c'est ce qui arrive avec les effets physiologiques, calorifiques et chimiques, et même avec le galvanomètre, mais dans le cas seulement où la roue dentée est dans le circuit.

Quant aux courants des ordres supérieurs, il est très-probable, par analogie, qu'ils consistent, le troisième en deux courants contraires correspondants à un des courants du second ordre, le quatrième en quatre courants correspondants aux deux du troisième ordre et ainsi de suite, puisque chaque courant doit toujours en induire deux de sens opposés dans un conducteur voisin. Tous ces courants ont une durée très-courte, ceux du même ordre doivent être égaux entre eux, mais différer comme ceux du second par leur facilité à être transmis dans un circuit non parfaitement continu. En effet, si l'on place un galvanomètre dans un circuit continu du troisième ordre, et qu'on ne fasse agir sur la spirale que des courants secondaires directs, en mettant la roue dentée dans le circuit secondaire, on a une série de courants tertiaires — . +; — +; — +; . . l'aiguille du galvanomètre indique l'égalité de ces courants opposés en se plaçant indifféremment à droite ou à gauche du zéro ou au zéro même. Il en est de même, lorsqu'on agit avec les courants secondaires inverses. Mais si l'on met la roue dentée

dans le circuit tertiaire, le galvanomètre n'accuse que la présence d'un seul courant au lieu d'indiquer celle de deux courants contraires comme dans le cas précédent. Lorsqu'on recueille, par exemple, les courants tertiaires développés par la *rupture* du circuit primaire, l'aiguille indique la série des courants — — — . . ., la série des courants + + + . . étant plus affaiblie que l'autre en passant du ressort sur la roue. C'est l'inverse quand on recueille les tertiaires développés par *l'établissement* du circuit primaire.

Lorsqu'on recueille une seule série de courants tertiaires, on remarque encore qu'une spirale fermée ou une plaque métallique voisine influent notablement sur les déviations de l'aiguille et les rendent moins considérables, lors même que les deux spirales tertiaires sont l'une et l'autre complétement fermées. L'explication de ces réactions se rattache d'ailleurs aux mêmes principes que celle des réactions analogues de deux spirales secondaires.

On obtient des résultats semblables, mais plus variables; quand on recueille au galvanomètre les courants quaternaires, ou quand on fait réagir deux spirales quaternaires l'une sur l'autre. On comprend, du reste, pourquoi les expériences sur ces courants ne présentent pas une constance rigoureuse, si l'on se rappelle que chaque courant quaternaire correspondant à la rupture du circuit principal, par exemple, doit consister en quatre courants — + — + alternativement contraires et de tensions alternativement variables.

En résumé, un courant primaire développe deux courants induits secondaires de sens contraire, l'un à son établissement, l'autre à sa rupture; ces deux courants peuvent être séparés par un intervalle de temps quelconque; ils sont égaux, mais n'ont pas la même tension, c'est-à-dire la même facilité à traverser des conducteurs imparfaits ou discontinus. Chaque courant secondaire peut déterminer deux courants tertiaires opposés, mais séparés par un intervalle de temps d'une durée inappréciable, vu que le courant secondaire est lui-même instantané. Ces deux courants tertiaires sont égaux, mais n'ont pas non plus la même tension. Chaque courant tertiaire doit

déterminer également deux courants quaternaires égaux, mais aussi de tensions différentes ; à chaque courant secondaire, c'est-à-dire à la rupture ou à l'établissement du courant primaire correspondent donc quatre courants quaternaires produits par les deux tertiaires. Si tous ces courants induits qui sont séparés par des intervalles de temps infiniment courts, avaient la même tension aussi bien qu'ils sont égaux, ou bien s'ils n'avaient à parcourir que des circuits parfaitement uniformes, ils se neutraliseraient mutuellement, et aucun effet ne se manifesterait. Mais il n'en est pas ainsi, et c'est pourquoi il y a production d'effets tenant à la supériorité de tension des courants dirigés dans un sens sur ceux dirigés dans l'autre.

Telle est l'explication la plus plausible qu'on puisse donner des courants des divers ordres ; nous verrons qu'elle se trouve confirmée par l'étude des phénomènes d'induction produits, non plus par les courants, mais par les décharges électriques qui, à cause de leur instantanéité, ont beaucoup plus d'analogie avec les courants induits que ceux-ci n'en ont avec les courants ordinaires.

§ 6. Induction produite par les décharges électriques.

On n'avait d'abord obtenu l'induction électro-dynamique qu'en se servant de courants électriques. Mais en voyant que des courants instantanés pouvaient eux-mêmes en produire des induits, Henry imagina que des décharges électriques, telles que celles d une bouteille de Leyde, pourraient aussi en développer. Il réussit en effet, mais en prenant beaucoup de précautions pour isoler les fils des spirales les uns des autres au moyen de la soie et de la gomme laque, et en séparant par du verre la spirale induite de la spirale inductrice. Du reste, en opérant avec des spirales disposées comme dans les expériences faites avec les courants voltaïques, il obtint des courants induits de différents ordres, et ayant la même direction les uns à l'égard des autres que celle qu'ils ont quand c'est le courant de la pile qui produit l'induction primitive. Il se passe dans le cas de l'induction opérée par les décharges un fait que nous avons déjà

signalé dans l'induction opérée par les courants induits : c'est l'influence qu'exerce une plaque conductrice ou une spirale fermée, interposée entre la spirale inductrice et la spirale induite. Le courant induit dans cette plaque ou dans cette spirale, étant du deuxième ordre, développe dans la spirale soumise à l'induction un courant induit du troisième ordre, par conséquent contraire à celui qu'y détermine l'action directe du courant inducteur ; il en résulte donc pour ce dernier, ou son annulation, ou du moins un grand affaiblissement. Cette observation importante explique pourquoi M. Savary modifiait ou même quelquefois annulait complétement la puissance aimantante des décharges, en plaçant les aiguilles sur lesquelles elles s'exerçait dans des enveloppes, ou dans le voisinage de plaques métalliques qui devenaient le siége de courants d'induction, dont l'action tendait à annihiler, ou du moins à diminuer beaucoup l'action directe de la décharge principale. M. Abria, en se servant de courants, au lieu de décharges, pour opérer l'aimantation, avait trouvé par contre que l'influence des enveloppes métalliques était tout à fait nulle ; observation assez d'accord avec celle de Henry, qui a remarqué que, lorsqu'on emploie les courants pour produire l'induction au lieu de décharges, les enveloppes sont sans influence, à moins qu'il ne s'agisse de l'induction opérée par des courants induits eux-mêmes, qui se comportent alors comme les décharges, ainsi que nous l'avons vu plus haut ; mais ce n'est pas avec ce genre de courants, mais bien avec des courants voltaïques ordinaires qu'opérait M. Abria.

Mais, sans nous arrêter à ces détails, nous devons aborder d'une manière plus directe l'étude des phénomènes qui ont lieu dans l'induction opérée par les décharges électriques. La question qui se présente est la même que celle que nous avons déjà abordée en nous occupant de l'induction opérée par les courants électriques; c'est de savoir qu'elle est la nature du mouvement électrique qui constitue la décharge induite. Est-ce un mouvement unique analogue à celui qui constitue la décharge inductrice elle-même? Est-ce plutôt la succession de deux décharges induites de directions opposées, l'une ayant lieu quand la dé-

charge inductrice commence et l'autre quand elle cesse, et séparées par conséquent par un intervalle d'une durée inappréciable? Il est clair que dans cette supposition que nous avons déjà énoncée pour expliquer les courants induits de différents ordres, il faut, pour que l'effet ne soit pas nul, que les deux décharges induites ne soient pas de même intensité, car sans cela elles se neutraliseraient. La solution de cette question n'est pas facile et nous allons l'étudier en parcourant rapidement les travaux des différents physiciens sur ce sujet.

M. Aimé avait, l'un des premiers, aperçu l'existence de la décharge induite en fixant sur les deux faces d'une lame de verre plusieurs bandes d'étain de manière à former deux circuits métalliques parallèles et discontinus. Au moment où il faisait passer à travers l'un des circuits la décharge d'une bouteille de Leyde, il partait des étincelles dans toutes les solutions de continuité du deuxième circuit. M. Henry, en opérant également avec deux bandes d'étain parallèles, avait vu au moyen de l'aimantation des aiguilles d'acier, la décharge induite changer de sens, effet qu'il avait d'abord attribué aux différences de distance entre le circuit inducteur et le circuit induit, mais qu'il chercha à expliquer plus tard en admettant qu'une décharge électrique détermine plusieurs décharges induites en sens contraire dont les différences d'intensité varient avec l'intensité absolue de la décharge inductrice. Il observa à cette occasion un fait remarquable, c'est qu'une simple étincelle de trois centimètres de longueur provenant du conducteur principal d'une machine et reçue à l'extrémité d'un circuit métallique placé dans une chambre, peut produire une induction assez forte pour aimanter des aiguilles placées près d'un circuit parallèle au premier, logé dans une cave à trente pieds de distance. Toutefois ni l'un ni l'autre des deux physiciens que nous venons de nommer n'avait résolu la question que nous avons posée.

M. Marianini avait cherché à la résoudre au moyen de l'aimantation du fer doux, substituée à l'aimantation des aiguilles d'acier. Voici l'appareil dont il se servait. Une aiguille à coudre, faiblement aimantée, est suspendue à un fils de soie très-fin, de

manière à demeurer horizontale. Au-dessous, et sur un plateau horizontal en bois, est fixé un petit cylindre de fer plus long que l'aiguille de deux centimètres environ, et entouré, dans toute sa longueur, d'une hélice de fil de cuivre recouvert de soie. Ce cylindre est disposé perpendiculairement à l'aiguille, quand celle-ci est en équilibre. D'après cette disposition il est évident que, si par une cause quelconque, et en particulier par un courant qui circule à travers le fil, le cylindre acquiert des polarités magnétiques, l'aiguille, sollicitée par des forces dans le même sens, sera déviée plus ou moins de sa position normale, suivant l'énergie de la cause agissante. Plusieurs essais ayant prouvé à M. Marianini que son instrument pouvait également servir à rendre sensibles les courants électro-magnétiques et les courants produits par l'électricité ordinaire, il l'avait appelé *rééléctomètre*. Après une étude détaillée de l'induction opérée au moyen des décharges électriques, qu'il avait nommée induction leydo-électrique, M. Marianini était arrivé à plusieurs résultats dont quelques-uns, tels que ceux qui sont relatifs à l'induction de différents ordres, avaient déjà été obtenus par Henry, et dont d'autres lui appartiennent exclusivement. Voici les plus importants :

En général, la décharge induite a la même direction que la décharge inductrice, toutes les fois que la bouteille de Leyde a une capacité passablement grande et qu'elle est bien chargée ; mais si la tension de la charge diminue, les dimensions de la bouteille restant les mêmes, ou, si les dimensions augmentent, la tension ne changeant pas, alors la décharge induite a une direction opposée à celle de la décharge inductrice. On peut encore, avec une même bouteille de Leyde, produire le même changement que déterminent la diminution des dimensions de la bouteille ou celle de sa charge, en altérant la faculté conductrice du circuit inducteur; altération qu'on produit, soit en allongeant beaucoup le fil métallique qui forme ce circuit, soit en y interposant des conducteurs liquides. Le savant italien cherche à expliquer ses résultats en distinguant le courant induit qui provient de l'invasion de la décharge de la bouteille de celui qui provient de la cessation de cette décharge, et en

admettant que l'induction définitive est toujours le résultat de la différence entre l'effet que produirait l'invasion seule et celui que produirait la cessation seule du courant. Mais pourquoi les dimensions de la bouteille, son degré de tension, le degré plus ou moins grand de conductibilité du circuit inducteur, déterminent-elles une rapidité plus grande pour l'invasion ou pour la cessation? En d'autres termes, pourquoi ces circonstances font-elles que l'induction opérée par la décharge qui commence l'emporte sur celle qu'opère la décharge qui finit? C'est là le point important qui ne nous paraît pas encore suffisamment éclairci par les recherches de M. Marianini. Nous voyons seulement que les causes qui tendent à diminuer la rapidité de la décharge tendent à rendre prédominante l'induction inverse qui a lieu au moment de sa cessation.

M. Matteucci, après avoir d'abord employé l'aimantation des aiguilles d'acier comme Henry, avait fait ensuite usage du galvanomètre, et il avait trouvé, contrairement à ce qu'il avait d'abord cru, que la distanee entre le circuit inducteur et le circuit induit n'influe nullement sur le sens de l'induction, mais uniquement sur son intensité. Il avait vu que cette intensité dépend, non-seulement de la distance, mais de la charge de la batterie, et que le sens de la décharge d'induction est toujours le même que celui de la décharge inductrice, si du moins le circuit induit est continu, car, s'il est interrompu, et qu'il parte une étincelle au lieu où est la rupture, la décharge induite est alors inverse de l'inductrice. M. Matteucci a également disposé plusieurs spirales à la suite les unes des autres pour avoir des courants d'induction de différents ordres. Il a constamment trouvé que, lorsque la décharge induite devient inductrice, la décharge qu'elle produit est inverse de la sienne propre. Mais les choses changent également s'il y a production d'étincelle dans l'un ou l'autre des circuits. Pour bien déterminer, dans ce cas, le sens de la décharge que le galvanomètre indique mal, étant lui-même peu influencé, M. Matteucci a employé un procédé fondé sur l'expérience du perce-carte, dans laquelle le trou que fait l'étincelle dans un morceau de papier ou dans une carte est toujours près de la pointe par laquelle arrive l'élec-

tricité négative; il faut que les deux pointes métalliques soient nécessairement d'un côté différent du papier et à une certaine distance l'une de l'autre, laquelle était de deux millimètres dans les expériences dont il s'agit. Au moyen de ce procédé combiné avec l'emploi du galvanomètre, M. Matteucci a trouvé que l'induction par la décharge de la bouteille est soumise à la loi suivante, savoir : que, lorsque le circuit inducteur et le circuit induit sont tous les deux fermés, la décharge induite est dirigée en sens contraire de l'inductrice, qu'il en est encore de même s'ils sont tous les deux ouverts de manière qu'il y ait une étincelle. Mais si l'un des deux circuits, n'importe lequel, l'inducteur ou l'induit, est fermé, et l'autre ouvert, de manière qu'il y ait une étincelle, la décharge induite est constamment dirigée dans le même sens que l'inductrice. Le sens des décharges ou des courants instantanés est indiqué quand le circuit est ouvert par la position du trou que fait l'étincelle dans le papier, et quand il est fermé, par le mouvement de l'aiguille du galvanomètre.

M. Riess s'est servi du condensateur pour déterminer la direction de la décharge induite, en faisant communiquer les extrémités du conducteur dans lequel s'opérait l'induction, l'une avec le plateau supérieur, l'autre avec le plateau inférieur. Mais, pour bien connaître le mode de propagation de la décharge induite, M. Riess avait remplacé le condensateur par un disque de métal recouvert d'une couche mince de résine sur ses deux faces; les deux extrémités du fil induit aboutissaient à deux pointes métalliques, entre lesquelles était placé le disque sur les faces duquel les deux électricités se répandaient. On projetait ensuite successivement sur chaque face le mélange de soufre et de minium pulvérisés qui sert à produire les figures de Lichtemberg, et, après des essais nombreux et variés, on parvenait à reconnaître un rapport bien constant entre la disposition et la forme des taches laissées par le soufre et le minium et la direction de la décharge induite; direction que le savant allemand trouva être tout à fait indépendante de l'intensité de la décharge inductrice, de la distance du fil induit au fil inducteur, de la conductibilité de l'un et l'autre circuit. Après avoir

bien établi par l'arrangement qu'affectaient le mélange des deux poudres, la *constance* de la direction, il fallait en déterminer le *sens;* pour cela l'emploi du condensateur devenait nécessaire, et on trouvait que ce sens était le même que celui de la décharge inductrice. Toutefois M. Riess reconnut ensuite, par de nouvelles expériences, que sa conclusion était trop absolue, et que si la disposition des taches indique bien que la nature du mouvement électrique, dont le fil induit est le siége, demeure constamment la même, il n'arrive pas toujours, quoique ce soit pourtant de beaucoup le cas le plus fréquent, que ce mouvement produise les mêmes effets que produirait une décharge unique dirigée dans le même sens que la décharge inductrice.

Nous ne nous arrêtons pas sur la méthode de M. Knockenhauer, fondée sur l'emploi du galvanomètre calorifique, c'est-à-dire sur le réchauffement opéré par la décharge induite dans le fil de platine d'un thermomètre électrique à travers lequel on la transmet. M. Riess avait déjà employé une méthode analogue, et il en avait déduit le pouvoir calorifique des décharges induites, et l'influence de diverses causes sur ce pouvoir, sujet sur lequel nous reviendrons en étudiant dans la quatrième partie les effets calorifiques en général de l'électricité. Mais cette méthode, propre tout au plus à mesurer l'intensité de l'induction, ne pouvait fournir de données sur sa direction, quoique M. Knockenhauer eût cru pouvoir, comme nous le verrons dans l'instant, en déduire que la décharge induite a une direction constamment inverse de celle de la décharge inductrice.

Il résulte de l'exposition rapide que nous venons de faire, que, ni l'aimantation de l'acier, ni l'aimantation du fer doux, ni l'emploi du galvanomètre, ni même celui du condensateur ne peuvent être regardés comme des méthodes parfaitement sûres pour déterminer la direction de la décharge induite. En effet, l'aimantation, même celle du fer doux, ainsi que l'a remarqué M. Marianini, dépend, non-seulement du sens, mais aussi de l'intensité de la décharge aimantante; le galvanomètre est d'un emploi difficile pour l'appréciation de courants instantanés tels que ceux dont il s'agit; et nous venons de voir

que Riess n'avait pas trouvé les indications du condensateur toujours irréprochables. Le perce-carte, dont fait usage M. Matteucci, ne peut servir que dans le cas particulier où la décharge induite donne une étincelle, et encore ne donne-t-il que la direction de la première décharge induite, et les effets calorifiques sont impuissants à donner la direction d'un courant. Toutefois, les résultats obtenus au moyen de ces méthodes plus ou moins imparfaites présentent un véritable intérêt scientifique, car ce sont des faits bien observés qui peuvent mettre les physiciens sur la voie la plus propre à conduire à la solution de la question.

Cette voie nous paraît être celle qu'a suivie un savant physicien français, M. Verdet. Sa méthode repose sur le phénomène connu sous le nom de *polarisation des électrodes*. Il est bien constaté par les expériences de Wollaston et de Faraday qu'une décharge électrique d'une faible tension peut produire des décompositions chimiques; mais d'autres recherches ont fait voir, en outre, qu'une semblable décharge, transmise à travers un liquide décomposable, au moyen de deux fils ou lames d'or ou de platine, les rend capables de produire ensuite eux-mêmes un courant électrique sensible au galvanomètre. Ce phénomène, qui a lieu également quand c'est un courant au lieu d'une décharge, qui a produit la décomposition chimique, se nomme, polarisation des électrodes. Le sens de ce courant, que nous appellerons *secondaire*, varie avec le sens de la décharge comme avec celui du courant; le fil par lequel a pénétré l'électricité positive, appelé pour cela l'électrode positif, se conduit comme le métal négatif du nouveau couple, et celui par lequel a pénétré l'électricité négative, c'est-à-dire l'électrode négatif, se conduit comme le métal positif. Le courant que produit ce couple, ainsi formé de ces deux métaux semblables, mais qui ont servi à transmettre la décharge, est d'autant plus fort que la décharge elle-même a été plus considérable; mais lorsqu'il s'agit de courants très-énergiques, ce n'est pas seulement la déviation plus ou moins grande qu'ils impriment à l'aiguille d'un galvanomètre, mais la durée de cette déviation qui varie avec l'intensité de la décharge primitive. Toutefois, pour les courants tels que

ceux dont il s'agit ici, on peut se contenter d'observer les déviations galvanométriques, et de déduire de leur sens et de leur amplitude la direction et l'intensité du courant secondaire, et par conséquent de la décharge qui a produit ce courant, en se rappelant que le sens du courant secondaire et celui de la décharge sont toujours inverses et que leurs intensités sont proportionnelles l'une à l'autre.

M. Verdet s'est servi, dans ses expériences, de spirales plates, dont les fils étaient isolés avec beaucoup de soin par la soie et une couche de vernis à la gomme laque. La spirale destinée à recevoir la décharge inductrice était faite d'un fil de cuivre de de 1 millimètre et demi de diamètre, et de 28 mètres de longueur formant 24 spires. Les spirales destinées à recevoir le courant induit, au nombre de trois, étaient faites d'un fil d'un demi millimètre de diamètre et de 48 mètres de longueur, formant 95 spires. Toutes les spirales avaient environ 25 centimètres de diamètre. La batterie se composait de 9 jarres, de 27 centimètres de hauteur sur 15 de diamètre chacune. On chargeait la batterie jusqu'à ce qu'une étincelle partît entre deux boules, dont la distance, mesurée par une vis de rappel, à 1 vingtième de millimètre près, servait de mesure à l'intensité de la décharge.

Les expériences de M. Verdet l'ont conduit à reconnaître que, quand le circuit induit est entièrement continu, on n'obtient des traces de polarisation que par des décharges excessivement fortes; les déviations galvanométriques ne sont que de 2 à 3°, et indiquent que la décharge induite a le même sens que l'inductrice. Si, au contraire, le circuit induit est interrompu quelque part, de manière qu'il y ait étincelle, le courant de polarisation devient très-sensible, mais les phénomènes paraissent d'abord très-irréguliers. Cependant on reconnaît aisément que la grandeur de l'intervalle, traversé par l'étincelle d'induction, exerce une grande influence sur le sens et l'intensité du courant induit. Pour apprécier cette influence, M. Verdet faisait partir les étincelles d'induction entre l'extrémité inférieure d'une vis micrométrique terminée en pointe et la surface d'une petite masse de mercure isolée dans une capsule de verre. Il a reconnu

que lorsque la direction du courant induit est telle que ce soit par la pointe que sorte l'électricité positive, et par conséquent que ce soit au mercure qu'arrive la négative, le sens de ce courant ne change pas quelle que soit la distance de la pointe au mercure, et son intensité croît rapidement avec cette distance. Du reste, dans ce cas, la direction de la décharge induite est semblable à celle de la décharge inductrice. Lorsque c'est la pointe qui est le pôle négatif, et le mercure le pôle positif, le courant induit varie irrégulièrement de sens et d'intensité; mais à partir d'une certaine distance entre la pointe et le mercure, la direction de la décharge induite devient constante et toujours identique à celle de la décharge inductrice.

Ces résultats s'expliquent très-bien si on a soin de ne pas perdre de vue qu'il y a toujours deux décharges induites, l'une *inverse*, l'autre *directe*, et que, si elles sont parfaitement égales, on ne doit obtenir aucun effet; c'est ce qui a lieu, ou à peu près, quand le circuit induit est entièrement continu. Mais, si, par une circonstance quelconque, l'une des décharges devient plus faible que l'autre, on obtient alors un effet d'autant plus considérable que la différence est plus grande, lors même que l'induction totale est beaucoup moindre. C'est ce qui arrive si le circuit induit présente une solution de continuité. Pourquoi cette solution de continuité favorise-t-elle la décharge directe, de préférence à l'inverse, surtout si l'appareil est disposé de façon que ce soit l'électricité positive de la directe qui sorte par la pointe? Il est probable que cela tient à la propriété que possède l'électricité positive de sortir plus facilement que la négative par les pointes; propriété dont nous verrons encore plusieurs exemples dans la quatrième partie. Il est vrai que, lorsque c'est l'électricité positive de la décharge inverse qui doit sortir par la pointe, celle-ci ne l'emporte pas toujours quoiqu'elle l'emporte quelquefois sur la directe. J'estime que cette anomalie tient à une autre propriété que nous étudierons également en nous occupant de la propagation de l'électricité, savoir, qu'un courant ou une décharge passent plus facilement entre deux électrodes, immédiatement après que ces électrodes ont transmis une décharge ou un courant inverse de celui qui va passer. Or,

la décharge induite directe est toujours précédée par la décharge inverse; elle doit donc être, en général, transmise plus facilement, c'est-à-dire en plus grande proportion, et par conséquent l'emporter en intensité sur l'autre. Quand les deux circonstances favorables sont réunies, elle l'emporte toujours; quand la seconde seule existe, elle l'emporte ou ne l'emporte pas, suivant la prépondérance relative des deux causes influençantes.

M. Verdet, en étudiant les décharges induites produites par des décharges induites elles-mêmes est parvenu à des résultats semblables. Le sens de la polarisation des électrodes est constant; il indique toujours la supériorité des décharges induites directes, mais elles ne deviennent sensibles qu'autant que le nouveau circuit induit est interrompu; s'il est continu, il n'y a pas de trace de polarisation. En effet, dans ce cas, tous les courants induits qui sont ici au nombre de quatre, puisqu'ils sont dus à l'action inductrice de deux décharges induites elles-mêmes, sont égaux, et comme ils sont inverses ils se détruisent mutuellement. Mais s'il y a solution de continuité, celle-ci faisant prédominer le courant direct, il y a alors un effet.

On voit que nous arrivons, en ce qui concerne les décharges, à des conclusions assez semblables à celles auxquelles était parvenu M. Abria en étudiant l'induction opérée par les courants voltaïques, à savoir que le sens de l'induction produite, soit par des courants instantanés tels que les courants induits des ordres supérieurs, soit par de simples décharges électriques, dépend toujours de la supériorité relative des courants ou des décharges induites, les unes inverses, les autres directes, ce qui conduit à reconnaître que, dans ce cas là, l'effet observé n'est pas un effet absolu, mais une différence entre 2, 4, ou un plus grand nombre de courants induits à peu près simultanés.

M. Knockenhauer, au contraire, était arrivé par une méthode différente de celle de M. Verdet à des conclusions complétement opposées. La méthode employée par ce physicien consistait à faire passer simultanément la décharge inductrice et la décharge induite à travers le fil de platine d'un thermomètre électrique, en disposant les communications dans deux expériences successives, de façon que l'une des décharges dut

traverser le fil de platine alternativement dans les deux sens opposés, le sens de l'autre demeurant constant. L'élévation de la température indiquée par le thermomètre n'était pas la même dans les deux circonstances, et si l'on admet que la plus grande élévation corresponde au cas où les deux décharges passent dans le même sens à travers le thermomètre, la plus petite au cas où elles passent en sens contraire, les expériences assigneraient à la décharge induite, contrairement aux résultats de M. Verdet, une direction contraire à celle de la décharge inductrice. Pour que cette conclusion fût exacte, il aurait fallu que l'expérience eût démontré l'exactitude du principe sur lequel elle repose, car rien ne prouve *à priori* que deux courants égaux qui circulent dans un même fil en sens contraire produisent un effet calorifique nul. Il y a plus, M. Matteucci, en combinant le courant d'une pile avec la décharge d'une bouteille de Leyde, a montré, au contraire, que les effets calorifiques de ces deux modes de production de l'électricité dynamique s'ajoutent toujours, quel que soit le sens relatif du courant et de la décharge.

Les recherches de M. Knockenhaner, fort remarquables du reste par le nombre et la précision des expériences, l'avaient conduit à considérer les phénomènes d'induction électro-dynamique; comme de simples effets d'influence dus à l'électricité statique, mais quand on étudie de près le sujet, il est impossible de confondre ces deux ordres de faits. L'électricité libre de la batterie ne peut pas être la cause de la décharge induite, laquelle est due uniquement à l'effet inducteur de l'électricité en mouvement; mais elle peut, il est vrai, donner naissance à un autre mouvement électrique qui ne dépend en aucune manière de la direction de la décharge principale. Ce mouvement, auquel on a donné le nom de *décharge latérale*, est une décomposition instantanée de l'électricité naturelle des conducteurs voisins, en vertu de laquelle l'électricité contraire à l'électricité libre de la batterie est attirée vers le fil inducteur et l'électricité semblable en est repoussée. Un conducteur soumis à l'induction, placé en conséquence dans le voisinage du conducteur d'une décharge, est toujours le siége d'une décharge latérale qui peut, en certains cas, simuler une véritable décharge induite.

On a la preuve qu'il n'y a pas, malgré l'apparence, identité entre ces deux décharges dans les étincelles qu'on peut tirer du courant induit aussi bien quand il est ouvert que lorsqu'il est fermé, au moyen d'un conducteur isolé qu'on en approche au moment où a lieu la décharge principale. On trouve ensuite ce conducteur chargé d'une électricité semblable à l'électricité libre de la batterie, conformément aux lois de l'induction de l'électricité statique. Le sens de la décharge induite n'a aucune influence sur cette classe d'effets qui sont, du reste, d'autant plus sensibles que la tension de l'électricité de la batterie est plus forte.

Ces phénomènes proviennent de ce que les deux surfaces de la batterie, que le fil conducteur d'une décharge fait communiquer entre elles, sont presque toujours chargées de quantités d'électricité très-inégales; il en résulte qu'au moment de la décharge, il y a sur chaque point du fil conducteur un excès d'électricité libre agissant par influence sur les corps voisins. C'est probablement à cet excès d'électricité libre qu'est due l'apparence lumineuse que présente, ainsi que M. Poggendorff l'a observé, un fil métallique qui transmet la décharge d'une batterie. Il paraît illuminé dans toute sa longueur, et donne des étincelles perpendiculairement à cette longueur. Si le fil est plié en deux parties parallèles très-rapprochées, c'est le côté extérieur qui seul est lumineux; s'il est en hélice, c'est également l'extérieur de l'hélice; preuve de plus que le phénomène est un phénomène d'électricité statique.

On comprend maintenant de quelles erreurs la décharge peut être la cause dans les expériences sur l'induction, surtout quand on se sert du condensateur, mais M. Verdet s'est assuré qu'elle n'a aucune influence sur la polarisation des électrodes, et que, par conséquent, elle n'entache d'aucune inexactitude les résultats obtenus sur les courants induits par ce mode d'investigation. En effet, le circuit induit étant ouvert, l'une de ses extrémités a été mise en communication avec l'un des fils de platine de l'appareil à décomposition, l'autre communiquant avec le sol; et, quelque forte que soit la charge de la batterie, il n'y a pas de polarisation sensible quand on opère la décharge, quoiqu'il y ait une forte décharge latérale. Cette décharge

latérale, phénomène connu sous le nom de *choc en retour*, qui joue un rôle important comme nous le verrons, et en particulier dans la chute de la foudre, a été l'objet de l'étude de plusieurs physiciens, et en particulier de M. Riess qui l'a trouvée intimement liée quant à sa portée, c'est-à-dire à la distance à laquelle elle a lieu, et en général à toutes les circonstances qui l'accompagnent, à la tension de l'électricité dans la batterie, et à la vitesse avec laquelle cette électricité s'écoule. M. Matteucci, de son côté, estime que bien des phénomènes attribués à la décharge latérale sont dus à une véritable induction qui s'opère dans les corps environnants, et il cite des faits curieux tendant à prouver que des corps même isolants sont susceptibles de l'éprouver. Il a trouvé que des lames de mica interposées entre plusieurs aiguilles d'acier successives diminuent le magnétisme acquis par ces aiguilles comparativement à celui que détermine la même décharge dans des aiguilles parfaitement semblables, disposées de la même manière, sauf qu'il n'y a pas de mica entre elles. Cet effet de la présence du mica varie quant à son intensité absolue avec la distance à l'aiguille du fil qui conduit la décharge. Quoi qu'il en soit, il semble prouver qu'en présence d'une décharge électrique, il se produit et se détruit immédiatement après dans le corps induit ambiant, des charges électriques qui se succèdent en sens contraires dans des intervalles très-rapprochés. Nous reviendrons sur ce sujet quand nous étudierons d'une manière spéciale le mode de propagation dans différents milieux de l'électricité dynamique, soit instantanée, soit continue. Pour le moment nous nous bornerons à exposer encore en peu de mots les résultats intéressants auxquels M. Riess est parvenu, quant à l'influence qu'exerce l'induction dans le phénomène du réchauffement des fils fins du métal traversés par une décharge électrique. Il a trouvé en effet que, si l'on place parallèlement et très-près de ce fil, un second fil semblable dont les deux bouts sont mis en communication, le courant induit dans ce second fil diminue en général l'effet calorifique de la décharge directe sur le premier, diminution qui paraît être due au ralentissement qu'éprouve la vitesse de cette décharge, et par conséquent son pouvoir échauffant qui

dépend essentiellement de la promptitude de l'écoulement électrique. Cette influence du courant induit est modifiée par la longueur du circuit qu'il parcourt, ayant pour une longueur déterminée un maximum qu'elle ne peut dépasser. En effet, la prolongation du circuit secondaire a une double conséquence : en premier lieu, de ralentir le courant qui s'y développe par l'effet de la décharge, et d'augmenter par là sa réaction sur le fil principal ; en second lieu, d'affaiblir ce courant et de diminuer au contraire cette même réaction. D'abord le premier effet prédomine, et l'on voit augmenter la réaction ; mais bientôt le courant secondaire s'affaiblit tellement que son influence disparaît de plus en plus jusqu'à devenir nulle passé une certaine longueur qui équivaut à une interruption complète du circuit.

Riess ne s'est pas borné à constater la réaction de la décharge induite sur la décharge directe, mais il a aussi fait, comme nous l'avons déjà dit, une étude toute particulière des décharges induites elles-mêmes, en se servant, pour en mesurer l'intensité, du réchauffement produit dans le fil très-fin de platine d'un thermomètre électrique à travers lequel elles sont transmises. Ce mode d'opérer ne pouvait donner à M. Riess la direction de la décharge induite, mais il avait trouvé par l'aimantation d'une aiguille d'acier que cette direction est la même que celle de la décharge inductrice. Toutefois il avait reconnu que le sens de l'aimantation imprimée à une aiguille par une décharge secondaire peut varier par des circonstances indépendantes de la direction de cette décharge, comme cela a lieu dans les expériences de Savary pour les décharges directes. Du reste, quant à l'intensité de la décharge induite, mesurée par l'effet calorifique, elle est proportionnelle à celle de la décharge inductrice et à la longueur efficace du fil qui conduit cette décharge, mais elle est en raison inverse de la distance des deux fils et indépendante de la conductibilité du fil induit. L'influence de conducteurs interposés sur l'effet calorifique du courant induit est très-sensible si ce conducteur est un fil métallique dont les deux bouts sont réunis, ou si c'est une lame très-conductrice, soit par sa nature, soit par son épaisseur. L'interposition d'un disque de cuivre de 15 centi-

mètres de diamètre et de 1 millimètre d'épaisseur a complétement annulé l'effet de réchauffement dans le fil induit, quoique la décharge inductrice fût produite par quatre jarres fortement chargées. Riess a trouvé qu'en général l'intensité du courant dans le fil secondaire est d'autant plus diminuée que l'épaisseur de la lame interposée est plus grande.

En résumé, il résulte de toutes les nombreuses recherches faites sur les décharges induites, que ce phénomène est un phénomène très-complexe, qui est influencé dans toutes les circonstances qui en constituent la nature par le mode même qu'on emploie pour la déterminer; ce qui fait que cette détermination est très-difficile. Toutefois on peut le réduire à cette expression très-simple, savoir qu'une décharge détermine, dans un circuit rapproché de celui qui la transmet, deux décharges induites, ayant la première une direction contraire, la seconde une direction semblable à celle de la décharge inductrice; que ces deux décharges opposées, se succédant l'une à l'autre dans un intervalle de temps d'une durée inappréciable, se neutralisent à peu près si le circuit induit ne présente aucune résistance, mais que si le circuit est interrompu ou par un fil fin qui s'échauffe, ou par un intervalle qui donne naissance à une étincelle, alors l'une des décharges l'emporte sur l'autre, et c'est généralement la seconde, c'est-à-dire celle qui chemine dans le même sens que l'inductrice. La cause de cette supériorité tient essentiellement aux conditions du circuit, qui facilitent davantage la transmission de l'électricité dans un sens que dans l'autre; elle doit tenir aussi à ce que la décharge directe étant la seconde, les causes qui retardent la propagation de l'électricité en général doivent agir proportionnellement moins fortement sur elle que sur la première. Toutefois nous ne dissimulerons pas que cette manière d'expliquer les phénomènes d'induction produits par des décharges ou des courants instantanés n'est pas celle adoptée par quelques physiciens allemands tels, en particulier, que M. Dove. Ce physicien et d'autres encore, M. Weber en particulier, se font de cet ordre de phénomènes des idées différentes et ne croient pas qu'on puisse les ramener à des lois aussi simples. Peut-être n'ont-ils

pas tout à fait tort. Du reste, on pourra en juger par l'exposition malheureusement abrégée que nous allons donner de leurs recherches dans les deux paragraphes suivants.

§ 7. Influence exercée sur l'induction par les masses métalliques placées dans l'intérieur des bobines.

Après avoir analysé les formes diverses sous lesquelles se présente l'induction électro-dynamique, nous allons maintenant étudier de plus près un point que nous n'avons fait que signaler, savoir l'influence qu'exercent sur les décharges comme sur les courants induits, la nature et la disposition des masses métalliques qu'on introduit dans l'intérieur des hélices destinées à produire l'induction. Cette influence se manifeste par la modification qu'elle exerce sur les propriétés des courants induits. Elle se montre d'ailleurs et s'explique par la production de courants induits qui a lieu sur la surface même de ces masses, quand elles sont continues et non formées de pièces isolées en plus ou moins grand nombre, en particulier sur la surface des aimants.

M. Dove a fait une étude toute particulière de ce sujet; il a, dans ce but, fait usage successivement de courants et de décharges pour produire l'induction, et est parvenu à des résultats parfaitement concordants. Établissant qu'on doit distinguer dans un courant, c'est-à-dire dans la neutralisation de deux électricités contraires, deux éléments, l'intensité originelle de ces deux électricités et le temps que dure leur neutralisation, ou, ce qui revient au même, la force du courant et sa durée, il arrive à reconnaître que, suivant la nature des effets qui sont produits, l'un des éléments exerce une influence plus grande que l'autre. Si les effets magnétiques, chimiques, physiologiques et calorifiques d'un courant électrique dépendaient également de sa force et de sa durée, l'égalité reconnue entre des courants, pour une de ces classes d'effets, aurait également lieu pour les trois autres. Mais ce n'est pas ainsi que les choses se passent. Les différences qu'on observe entre les effets de deux courants qui proviennent de la neutralisation de quantités égales d'électricité doivent donc être attribuées à une différence

dans la durée de cette neutralisation Ces différences sont surtout sensibles quand on compare les effets galvanométrique et chimique qui sont proportionnels l'un à l'autre, avec l'effet physiologique ; or, ce dernier n'est nullement proportionnel à la déviation de l'aiguille ni aux quantités de gaz données par le voltamètre ; il n'est point, comme les deux autres, un produit de la durée par la force ; il ne dépend que de cette dernière et s'accroît, par conséquent, avec la rapidité de la neutralisation. C'est ainsi que la même décharge d'une bouteille de Leyde qui ébranle violemment le corps et ne fait pas dévier une aiguille, peut, si elle est soutirée par une pointe lentement, affecter un galvanomètre dont les tours sont bien isolés et ne pas produire de secousse dans le corps humain qui est placé sur sa route ; c'est pourtant la même quantité d'électricité dans les deux cas. La propriété que possède le courant d'aimanter l'acier trempé est du même ordre que son effet physiologique. Si donc on a deux courants développés dans le même conducteur, que ces courants produisent la même déviation au galvanomètre, et que l'un détermine un effet physiologique plus fort et des étincelles plus vives que l'autre et communique à l'acier une aimantation plus forte, il faudra en conclure que la même quantité d'électricité s'est mue en moins de temps dans le premier que dans le dernier ; et réciproquement, lorsque l'effet physiologique et aimantant de deux courants sera le même, celui de ces deux courants, dont l'effet sera le moindre au galvanomètre, se sera mû dans un temps plus court que l'autre, tout en étant composé de la même quantité totale d'électricité.

Ces différences qui distinguent d'une manière frappante les phénomènes de l'électricité des machines ordinaires à frottement de ceux de l'électricité voltaïque, ne sont pas moins sensibles quand on compare les courants d'induction les uns avec les autres, et quand, sans rien changer au circuit induit, on se borne à modifier la nature et l'agrégation mécanique des masses métalliques qu'on met dans l'hélice ; modifications qui suffisent pour en entraîner une considérable dans les propriétés des courants induits eux-mêmes.

Nous avons déjà remarqué qu'en aimantant par le courant

électrique qui parcourt le fil d'une hélice des paquets de fil de fer, on obtient des secousses beaucoup plus fortes que quand on se sert d'un cylindre de fer massif. M. Dove, pour établir une comparaison exacte entre l'action physiologique et l'action galvanométrique sous le rapport de l'influence qu'exerce sur chacune d'elles la nature et l'état du fer qu'on emploie, s'est servi de deux hélices parfaitement semblables faites d'un gros fil de cuivre et parcourues successivement par le même courant voltaïque. Ces hélices agissaient par induction sur une hélice superposée sur chacune d'elles. Ces nouvelles hélices, faites d'un fil beaucoup plus fin, communiquaient entre elles par une de leurs extrémités, de telle façon que la direction du courant d'induction dans l'une fût opposée à celle de ce courant dans l'autre. Les deux extrémités libres du système des deux hélices étaient munies de poignées qui permettaient de compléter le circuit par l'intermédiaire du corps ou par celui du galvanomètre. Dans l'un et l'autre cas, les deux courants d'induction étant inverses se neutralisaient. Il n'en était plus de même quand on introduisait dans l'intérieur de chaque hélice des fils ou des masses de fer. M. Dove, après avoir introduit successivement dans l'une des hélices des cylindres faits de fer forgé de différentes espèces de fonte et d'acier trempé, plaçait en même temps dans l'autre le nombre de fils nécessaire pour rendre nul, soit l'effet galvanométrique, soit l'effet physiologique. Il déterminait ainsi le nombre de fils nécessaire pour établir la compensation, soit l'équilibre entre le courant induit par le cylindre massif et le courant induit par le faisceau des fils ; ce nombre était différent suivant qu'on appréciait le courant par son effet au galvanomètre ou par son effet sur la sensation. Ainsi, avec le fer forgé, 110 fils ne suffisaient pas pour établir l'équilibre galvanométrique, 15 suffisaient pour l'établir pour la sensation ; avec l'acier trempé, il en fallait 28 dans le premier cas, 7 dans le second ; avec la fonte grise à air froid, 27 et 11. On a obtenu des résultats analogues avec un galvanomètre différentiel, dont les deux fils étaient traversés chacun par un des courants d'induction ; ceux-ci ayant été rendus égaux, quant à leur action sur le galvanomètre, ils ne l'étaient

pas quant à l'action physiologique; la supériorité pour ce dernier genre d'effet appartenait à celui qui provenait de l'hélice dans laquelle étaient les fils. Quant aux différentes espèces de fer, l'expérience montre que, si on les classe d'après l'effet galvanométrique, on obtient une série différente de celle à laquelle on parvient en les classant d'après l'effet physiologique. Ainsi ce dernier effet dépend non-seulement de la discontinuité de la masse, mais aussi de la nature même du fer. Aussi peut-on arriver, en combinant les deux causes, à trouver des fils de fer doux d'un certain diamètre capables de compenser l'action d'un cylindre d'une certaine espèce de fer, aussi bien par rapport au galvanomètre que par rapport à la sensation. Ce double résultat était obtenu, par exemple, avec 12 fils de 6 millimètres de diamètre et un cylindre de fonte grise du fourneau à creuset. Au reste, l'influence de la nature du fer tient probablement elle-même à quelque différence dans la constitution moléculaire de la masse. Ainsi la fonte brute grise est de toutes les espèces de fer celle qui se rapproche le plus des paquets de fils quant aux effets d'induction, son action physiologique étant relativement plus grande qu'on ne devrait s'y attendre d'après l'intensité du courant développé au galvanomètre. Ce résultat semblerait indiquer que, dans cette fonte, la partie de fer susceptible d'aimantation ne forme pas une masse continue, ce qui s'accorde avec les recherches chimiques de M. Karsten.

Les expériences faites au moyen de l'aimantation de l'acier, et en comparant la vivacité des étincelles, ont confirmé les résultats précédents et ont démontré ainsi d'une manière générale que dans un courant d'induction développé en se servant d'un faisceau de fils, une même quantité d'électricité se meut en moins de temps que quand elle est le résultat de l'induction produite par un cylindre massif. Les tubes substitués au fer agissent comme des cylindres forgés et annulent complétement l'effet des fils qu'on met dans leur intérieur, sauf dans le cas où ils sont sillonnés d'une fente longitudinale; car alors l'introduction d'un certain nombre de fils de fer augmente l'effet physiologique, mais ne modifie en rien l'action sur le galvanomètre qui ne paraît, en conséquence, partir que de l'enveloppe

de fer. Dans les expériences dont il s'agit, les tubes étaient des cylindres creux de la dimension d'un canon de fusil; les résultats ne sont plus les mêmes quand on se sert de tubes faits de tôle mince; les fils agissent à travers ces tubes tout fermés qu'ils sont, de manière à accroître l'effet galvanométrique, et même proportionnellement plus que l'effet physiologique; mais si le tube mince est fendu longitudinalement, le résultat est inverse, et l'introduction des fils accroît davantage l'effet physiologique que si elle a lieu dans un tube fermé.

Des enveloppes conductrices fermées ou non fermées, telles qu'un fil métallique isolé et enroulé en hélice autour d'un tube de carton dans lequel on place le fer, dont les deux extrémités sont réunies ou isolées, telles encore qu'un tube de laiton fermé ou fendu dans sa longueur, produisent des effets qui sont parfaitement en accord avec ceux que nous avons obtenus en nous servant de fils de fer ou de cylindres massifs. L'hélice fermée et le tube de laiton continu diminuent l'action d'un faisceau de fils de fer qu'ils entourent, de manière à rendre cette action semblable à celle d'un cylindre de fer massif, et même inférieure, quoiqu'elle lui fût très-supérieure avant que les fils de fer eussent été ainsi enveloppés. Le tube fendu dans sa longueur produit ainsi un affaiblissement moindre que le tube fermé, mais un peu plus considérable qu'une hélice dont les extrémités ne sont pas réunies. On peut, en fermant le circuit du tube fendu, au moyen du fil d'un galvanomètre, constater l'existence du courant induit. Ces expériences montrent que la différence que nous avons trouvé exister entre l'action d'un faisceau de fil de fer et celle d'un cylindre massif tient essentiellement à ce que des courants d'induction peuvent s'établir sur la surface du cylindre.

Il résulte de tous les faits que nous venons de décrire que la diversité d'effets que manifestent les courants d'induction tient à une différence dans leur *durée*, et non à une différence dans leur *énergie*. L'enveloppe métallique qui entoure un faisceau de fils ou la surface continue d'un cylindre de fer massif n'*affaiblit pas* l'action d'induction, mais elle la *retarde*. Ce retard est sans influence sur l'aiguille du galvanomètre, sur laquelle s'accu-

mulent les effets du courant, opération pour laquelle la durée est sans importance, mais il diminue beaucoup l'effet physiologique et l'action aimantante. C'est à la même cause qu'on doit attribuer le fait que les étincelles et les secousses produites par l'extra-courant, c'est-à-dire par le courant induit sur lui-même dans une hélice dont l'axe est occupé par un faisceau de fils de fer ou par des morceaux de fer massif, disparaissent presque en entier quand on place les fils ou les morceaux de fer dans un tube de laiton fermé; mais il n'en est plus de même si le tube de laiton est ouvert. Un bout de canon de fusil fermé et ouvert donne les mêmes résultats que le tube en laiton; seulement avec le canon fermé il y a encore une faible secousse.

Une remarque assez importante que fait M. Dove, et dont j'ai eu souvent l'occasion de constater l'exactitude, c'est qu'on augmente beaucoup les effets, toutes les autres circonstances restant les mêmes, en renversant la polarité du fer, quel qu'il soit, dans l'intérieur des hélices, au moyen d'un changement dans la direction du courant. Ce résultat tient à ce que le fer, même le plus doux, conserve toujours une polarité magnétique plus ou moins forte, lors même que l'aimantation a cessé, si du moins elle s'est prolongée un peu longtemps. Il en résulte que le courant d'induction, produit par la rupture du circuit, est moins fort que si l'aimantation à ce moment cessait complétement. Or, en renversant la polarité, on obtient nécessairement ce résultat. En général, le plus fort effet d'induction appartient au métal dont l'état magnétique éprouve le plus grand changement; les indications du galvanomètre sont, dans ce cas, analogues à celles qui résultent de la sensation. Plusieurs exemples montrent que, si l'on ne tenait pas compte de ce principe de l'accroissement d'énergie par le renversement de la polarité, il serait impossible de comparer entre elles diverses sortes de fer; ainsi l'acier doux et l'acier trempé, lorsqu'on renverse leur polarité, l'emportent sur toutes les espèces de fontes; et celles-ci, à leur tour, lorsque leur polarité est renversée, ont toutes une plus grande énergie que l'acier doux et l'acier trempé. Il en est de même pour les diverses espèces de fonte, les unes par rapport aux autres, et pour les faisceaux de fils de fer.

Après avoir fait usage des courants électriques, M. Dove a employé les décharges pour produire l'induction, en vue de déterminer l'influence que peut exercer sur les décharges induites l'introduction de toute espèce de métaux. L'appareil dont il se servait, et qu'il avait nommé *inducteur différentiel*, consistait en deux hélices faites de deux gros fils de cuivre rouge et roulées sur deux tubes de verre de 33 centimètres de longueur sur 2,5 centimètres de diamètre. Les spires de ces fils étaient isolées avec beaucoup de soin, au moyen d'une épaisse couche de gomme laque. Deux autres hélices plus grandes, mais parfaitement semblables l'une à l'autre, roulées dans le même sens autour d'un tube de carton et composées du même nombre de

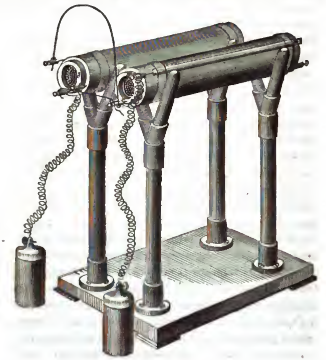


Fig. 454.

tours, recevaient dans leur intérieur les hélices primitives. Celles-ci transmettaient la décharge d'une batterie de bouteilles

de Leyde, qui traversait successivement les deux fils; il en résultait une décharge induite dans les deux hélices enveloppantes. Des quatre bouts de ces hélices, deux appartenant chacun à une hélice différente étaient mis en communication par un conducteur et les deux autres servaient à transmettre la décharge induite à travers le corps humain, le fil d'un galvanomètre, une spire magnétisante, ou un voltamètre. Par la disposition de l'appareil on pouvait introduire à volonté, dans l'intérieur des hélices, des cylindres massifs ou des faisceaux de fils métalliques. Cet appareil, quoique destiné essentiellement à l'induction produite par les décharges d'électricité ordinaire, peut servir également dans les cas où l'on emploie les courants voltaïques au lieu de décharges (fig. 154).

Les hélices du circuit induit peuvent être unies de façon que les décharges induites marchent dans le même sens, ou de façon qu'elles marchent en sens contraire. Dans ce dernier cas elles se neutralisent complétement, de sorte que si l'introduction d'une substance quelconque dans l'intérieur d'une des hélices modifie en quoi que ce soit l'induction opérée par cette hélice, on s'en aperçoit immédiatement parce que la neutralisation n'a plus lieu et que l'une des décharges induites l'emporte sur l'autre. Malheureusement le galvanomètre, le voltamètre chimique, et l'aimantation du fer doux ne sont nullement influencés par le courant instantané de la décharge induite, de sorte qu'il faut recourir à d'autres moyens pour la percevoir, c'est-à-dire à la secousse et à l'aimantation des aiguilles d'acier. M. Dove a fait usage de la secousse physiologique qui indique, par son degré d'intensité, de combien l'un des courants instantanés est supérieur à l'autre; mais pour avoir le sens du courant définitif et connaître laquelle des deux hélices donne un courant supérieur à l'autre, il s'est servi de la méthode de M. Riess, savoir, d'un condensateur et des figures tracées par les deux électricités sur des gâteaux de résine placés entre les deux extrémités du fil induit. C'est en opérant ainsi qu'il a trouvé que l'effet physiologique du courant d'induction, développé par la décharge de la bouteille, est affaibli par l'introduction dans la bobine des métaux non-magnétiques, et d'autant plus qu'ils sont plus con-

ducteurs. Cette diminution est donc moindre pour l'*antimoine*, le *bismuth* et le *plomb* que pour le *cuivre*. L'effet de ces cylindres est le même que celui d'hélices dont les deux bouts sont réunis; il est alors le résultat de la réaction que les courants instantanés qui se développent sur leur surface exercent sur le circuit secondaire. Aussi les tubes fendus longitudinalement et des faisceaux de fils diminuent-ils beaucoup moins l'effet de l'induction que des cylindres continus. Le *fer forgé*, *l'acier trempé* et *non trempé*, la *fonte grise* ou *blanche* diminuent également par leur induction l'effet physiologique; mais il n'en est pas de même des faisceaux de *fils de fer* isolés; il y a alors, au contraire, augmentation. Le condensateur, dans ce cas, indique que le courant instantané a marché en sens inverse du cas précédent; preuve que l'introduction des fils n'*affaiblit* pas, mais *augmente* l'effet de l'induction. Si on enveloppe le faisceau de fils de fer d'une surface continue de cuivre, il agit alors comme un cylindre massif et diminue l'action. Il en est de même si on l'entoure d'un fil enroulé en hélice, dont les deux bouts sont unis; mais il faut que ce fil soit bon conducteur. Une masse solide de *nickel* augmente l'induction et agit comme un faisceau de fils de fer; cela tient probablement à son faible degré de conductibilité jointe à sa grande vertu magnétique.

Ce que nous venons de dire suffit pour bien établir la différence qu'il y a entre l'introduction produite par des décharges et celle que produisent des courants électriques continus au moment où ils cessent de passer. Les effets physiologiques, loin de *diminuer*, *augmentent*, par l'induction dans une hélice d'un morceau de fer quelconque; il est vrai qu'ils augmentent davantage si la masse de fer présente des solutions de continuité parallèles à l'axe; quant aux effets galvanométriques, qui sont appréciables dans ce cas, on se rappelle qu'ils sont plus sensibles avec des cylindres massifs qu'avec des faisceaux de fils, et que des solutions de continuité dans les cylindres, ou une enveloppe autour des fils, ne modifient nullement leur action. L'introduction de métaux non-magnétiques dans l'intérieur des hélices ne produit non plus dans ce cas aucun effet.

Si, au lieu de se servir des effets physiologiques pour étudier

l'induction opérée par les décharges, on fait usage de l'aimantation des aiguilles d'acier, on trouve que, loin d'affaiblir l'action, l'introduction d'une masse de fer quelconque dans l'intérieur d'une hélice l'augmente sensiblement; mais d'autant plus, il est vrai, que cette masse est plus divisée parallèlement à son axe; c'est exactement ce qu'on trouve avec les courants. Ainsi, lorsqu'il s'agit de l'aimantation des aiguilles d'acier, les courants continus et les décharges des batteries présentent des phénomènes toujours semblables, ce qui n'est pas le cas avec les effets physiologiques. Les effets calorifiques sont, comme ces derniers, diminués par l'introduction du fer, quelle que soit sa forme; c'est l'inverse quand l'induction est produite par un courant continu au lieu de l'être par une décharge.

En résumé, quand on opère avec des *décharges électriques ordinaires*, l'introduction d'un solide de fer dans une des hélices de l'inducteur différentiel *affaiblit* l'action physiologique, calorifique et de tension, soit électroscopique de la décharge, mais en *augmente* l'effet d'aimantation.

Elle *augmente* indistinctement tous ces effets quand on emploie les *courants voltaïques*.

L'introduction de faisceaux de fils de fer agit comme la masse solide avec les courants voltaïques. Elle *augmente* également dans le cas des décharges électriques tous les effets, sauf l'effet calorifique qu'elle *diminue*.

Enfin, quand pour aimanter le fer, au lieu d'employer des courants ou des décharges circulantes dans une hélice, on approche un aimant, on n'augmente pas l'action du courant d'induction en divisant le fer en fils; on ne la voit pas non plus diminuer quand on entoure ces fils d'une enveloppe conductrice. C'est que l'aimantation par l'aimant ne détermine pas, comme celle par l'hélice, des courants d'induction autour de la surface de l'aimant ou de l'enveloppe, et qu'elle consiste seulement à produire des pôles magnétiques.

M. Dove conclut donc de toutes ses expériences qu'il faut distinguer, dans tous les effets relatifs à l'influence qu'exerce sur l'induction l'introduction de masses métalliques dans l'intérieur des hélices, deux phénomènes distincts:

1° Ceux qui sont dus à la polarité magnétique qu'acquièrent ces masses, quand elles sont susceptibles de s'aimanter ;

2° Ceux qui sont dus aux courants induits qui se développent autour de leur surface, plus ou moins facilement, suivant leur degré de conductibilité et leur continuité plus ou moins grande.

La polarité magnétique ne se développe pas instantanément, mais quand le courant primitif est d'une nature continue, le magnétisme a tout le temps d'atteindre son maximum, et son action inductrice l'emporte aisément sur l'action contraire qu'exercent les courants qui sont induits par la rupture du circuit primitif autour de la surface du fer. Tout ce qui peut empêcher le développement de ces courants augmente encore davantage l'effet qui est dû au magnétisme. Au contraire, quand le courant inducteur n'est qu'instantané, comme la décharge d'une batterie, le magnétisme n'ayant pas le temps de se développer entièrement, les courants induits directs qui ont lieu au moment où la décharge cesse l'emportent sur l'action contraire due au magnétisme qui disparaît. On conçoit encore ici qu'on peut, en empêchant les courants de se former, soit en employant des métaux d'une très-faible conductibilité, comme le nickel, soit en les réduisant en fils isolés d'un très-petit diamètre, renverser complétement les phénomènes et faire prédominer l'effet dû à la polarité sur l'effet devenu nul, ou à peu près nul, qui provient des courants induits. Mais ces actions contraires ne s'équilibrent pas en même temps pour toutes les espèces d'effet, parce que ces effets sont chacun une fonction différente de la quantité d'électricité mise en mouvement dans le courant induit et de la durée de ce courant, qui dépend elle-même du ralentissement produit par le courant induit autour de la surface du métal intérieur.

M. Dove a eu l'idée qu'en empêchant les courants induits de se former autour de masses métalliques autres que des masses de fer non-magnétiques, en les divisant dans ce but en fils très-fins, on pourrait peut-être leur faire jouer dans l'induction un rôle analogue à celui des fils de fer, à l'intensité près, et découvrir ainsi chez eux des traces de magnétisme, s'il en existe.

L'antimoine, le plomb, le bismuth, l'étain, le zinc et le mercure en ont donné; le laiton également, mais il fallait en faire des fils très-minces et bien vernis; le courant partait de l'hélice dans laquelle on en mettait un paquet, l'autre ne renfermant rien. On peut trouver un diamètre de fils tel que les effets se compensent, c'est-à-dire pour lequel l'effet du courant induit circulant autour de la surface neutralise l'effet de la polarité magnétique du fil. Le mercure avait été mis dans des tubes de verre très-minces fermés avec de la cire à cacheter aux deux bouts. Tous les autres fils étaient recouverts d'une couche de vernis à la gomme laque pour être bien isolés les uns des autres. Il faut ajouter que, sauf pour le cuivre, le zinc et le mercure, on n'était pas parfaitement certain que les métaux ne continssent point de fer. Au reste, nous verrons dans le chapitre suivant des preuves d'un autre genre que la puissance magnétique est bien plus générale qu'on ne l'a cru longtemps, et que tous les corps la possèdent à des degrés divers.

Il nous reste encore à parler de l'étude toute spéciale que M. Dove a faite des courants d'induction qui ont lieu au commencement et à la fin d'un courant primaire, dans le conducteur même qui transmet ce courant; il nomme ces courants *contre-courants*, pour les distinguer des *juxta-courants* qui ont lieu dans des circuits parallèles au circuit inducteur. Il s'est servi dans ce but d'une machine magnéto-électrique, analogue à celle de Saxton, pour produire les courants primaires, qui étaient naturellement instantanés. Une petite hélice dont les spires, réagissant les unes sur les autres, produisaient les contre-courants, était placée dans le circuit. L'appareil était disposé de façon que le circuit pût être fermé de quatre manières : 1° de façon à saisir le courant primaire sans que l'hélice fût dans le circuit; 2° de façon à le saisir, l'hélice étant dans le circuit, par conséquent avec les deux contre-courants opposés, l'initial et le final; 3° de façon, en n'ayant que l'hélice seule dans le circuit, à ne percevoir que le contre-courant final; 4° de façon à n'avoir, l'hélice étant dans le circuit, que le courant primaire et le contre-courant initial. En appelant p le courant primaire, A le contre-courant initial, et E le contre-courant

final, on a dans le premier cas p; dans le second, $p - A + E$ (le second contre-courant étant dans le même sens que le primaire); dans le troisième cas, E tout seul ; et dans le quatrième, $p - A$. L'expérience a montré, dans tous les cas, que les contre-courants étaient soumis aux mêmes influences par l'effet de l'introduction de masses métalliques, magnétiques ou non, divisées ou non, que les juxta-courants, soit courants d'induction ordinaires. Les circonstances qui font varier A et E ont été étudiées avec soin, avec l'aide soit des effets physiologiques, soit du galvanomètre, soit du voltamètre chimique, afin de pouvoir bien connaître l'action de $p - A$, et celle plus compliquée de $p - A + E$. Or, ce qui résulte de plus intéressant de ce travail, c'est que les circonstances qui font varier A ne sont point toujours les mêmes que celles qui font varier E ; en sorte que A et E, quoique étant des contre-courants provenant du même courant primaire, ne sont point généralement égaux. C'est ce qui explique pourquoi, dans les phénomènes d'induction produits avec l'électricité ordinaire, A et E ne se neutralisent point complétement, comme aurait pu le faire croire la courte durée du courant primaire p.

Les phénomènes découverts par M. Dove semblent, en général, être peu favorables à l'hypothèse d'Ampère sur la nature du magnétisme ; en effet, si un aimant se compose d'un assemblage de courants électriques, circulant autour de sa surface, comment se fait-il que l'induction, en excitant de semblables courants sur la surface d'un cylindre de fer, contrarie l'effet que tend à produire la vertu magnétique de ce même cylindre? Il faut pour cela qu'il y ait opposition entre ces deux genres d'action, d'où il résulte que l'une ne peut pas être la cause de l'autre ; les courants et la polarité magnétique développés dans le fer par l'électricité en mouvement sont donc deux agents distincts, capables de l'emporter, tantôt l'un, tantôt l'autre, pouvant s'équilibrer exactement dans certaines circonstances, mais se contrariant toujours. Il est vrai qu'Ampère suppose que les courants auxquels la polarité est due sont moléculaires, ce qui établit une grande différence entre eux et les courants finis que l'induction détermine autour de la surface des aimants.

Dans ce cas, un faisceau de fils de fer aimantés par le courant qui traverse une hélice se rapproche le plus possible du solénoïde d'Ampère. Mais pour représenter un aimant, il lui faudrait l'enveloppe conductrice dont l'absence établit une si grande différence entre l'action d'un faisceau et celle d'une masse solide de fer. D'ailleurs la théorie et l'expérience ont prouvé que, moléculaires ou non, les courants qui constituent un aimant se conduisent comme un assemblage de courants fermés circulant autour de sa surface. Comment donc peut-il se faire que ces courants, au lieu de favoriser, contrarient l'effet de courants semblables produits par l'induction?

Pour résoudre cette difficulté, il faut, en effet, admettre qu'il y a une très-grande différence entre les courants moléculaires d'Ampère qui produisent l'aimantation, et les courants finis qui parcourent une surface conductrice. Cette différence consiste essentiellement, suivant nous, en ce que les courants moléculaires préexistent dans les particules du corps magnétique avant même qu'il soit aimanté, et que l'aimantation ne fait que déplacer les particules, de façon que tous ces courants aient la même direction, la direction voulue d'après les lois de l'électrodynamique. Ce déplacement des molécules est analogue à celui d'un conducteur mobile traversé par un courant, et sur lequel agit une force attractive extérieure. Nous avons déjà vu que toutes les circonstances, et en particulier les actions calorifiques et mécaniques qui favorisent l'aimantation, quelle que soit la cause qui la produise, sont favorables à cette opinion. Mais le courant d'induction est toute autre chose; c'est un courant qui, par l'effet d'une cause extérieure, vient à circuler instantanément sur une surface, comme tout autre courant, à laquelle elle servirait de conducteur, et cela sans déplacer les particules. Le mode d'établissement comme la durée de ces deux espèces de courants doivent être très-différents. On conçoit donc très-bien comment la décharge primitive agissant directement sur le fer détermine les courants moléculaires à s'arranger parallèlement à sa direction et dans le même sens qu'elle, et comment cette même décharge produit un courant secondaire dans l'hélice extérieure, et enfin par induction sur la surface du fer, un

courant instantané. Ce courant réagit sur celui de l'hélice induite en en développant un dirigé en sens contraire de celui qui la parcourt; il diminue donc la puissance de ce dernier, comme l'expérience le prouve; mais il la diminue seulement pour les effets qui exigent une grande vitesse dans la circulation de la décharge. Quant aux courants moléculaires qui constituent l'aimantation, ils doivent tendre, non à diminuer, mais à augmenter l'effet d'induction dans tous les cas, puisqu'ils ne font augmenter que le premier effet de la décharge primitive, vu qu'ils ne disparaissent pas assez vite pour produire un second courant d'induction opposé au premier. Il est facile maintenant de comprendre pourquoi, en faisant disparaître les courants superficiels par la division mécanique de la masse, tout en conservant les moléculaires qui constituent l'aimantation, on renforce, dans tous les cas, le courant d'induction, la cause qui tendant à le diminuer n'étant plus là. Il n'y a qu'une seule exception; elle est relative aux effets calorifiques, et tient probablement à ce que l'aimantation, ne s'opérant pas instantanément, prolonge la durée de la décharge induite, tout en en augmentant, il est vrai, l'intensité; double action contraire dont le résultat est de diminuer la puissance calorifique sur laquelle, comme on le verra, la vitesse de la décharge a une influence proportionnellement plus grande que ne l'a l'intensité.

§ 8. Considérations générales sur l'induction électro-dynamique.

Après avoir exposé les phénomènes divers de l'induction opérée par les courants et par les décharges, il nous reste à les envisager dans leur ensemble et dans leurs rapports avec les autres phénomènes électriques. Plusieurs physiciens, notamment Lenz, Weber, Neumann, se sont occupés de cet ordre de questions en cherchant à ramener l'induction à des lois générales et à en donner des théories plus ou moins satisfaisantes. Nous allons chercher à résumer les points qui nous paraissent

le mieux établis par leurs recherches en y ajoutant quelques observations et nos propres idées sur ce sujet.

Peu de temps après la découverte de l'induction électro-dynamique par Faraday, Lenz avait déjà réussi à en formuler les résultats d'une manière générale très-simple et très-satisfaisante. Voici le principe qu'il avait établi : *Si un conducteur métallique se trouve dans le voisinage d'un courant électrique ou d'un aimant, il se développe en lui un courant électrique dont la direction est telle qu'il aurait produit dans ce fil un mouvement directement contraire à celui qui lui a été donné pour développer le courant d'induction, en supposant que le fil n'eût pu être mis en mouvement que dans la direction même où il l'a été ou dans une direction précisément contraire.* Il résulte de ce principe qu'il est toujours facile de connaître dans quel sens doit cheminer le courant d'induction en se rappelant que ce sens est inverse de celui dans lequel cheminerait un courant qui produirait, par l'action électro-dynamique, le même mouvement qu'on opère mécaniquement pour développer l'induction. Lenz lie ainsi d'une manière intime les phénomènes d'induction avec les phénomènes électro-dynamiques d'Ampère, car à chaque phénomène de mouvement électro-dynamique correspond un phénomène magnéto-électrique, soit d'induction électro-dynamique. C'est ce qu'il est facile de démontrer en examinant successivement différents cas.

1° Cas de deux fils conducteurs parallèles parcourus tous les deux par des courants qui s'attirent ou se repoussent, suivant qu'ils vont dans le même sens ou dans des sens contraires. Cas correspondant de deux fils conducteurs parallèles, dont l'un seulement est traversé par un courant, tandis qu'on en approche ou qu'on en éloigne mécaniquement l'autre, ce qui détermine chez lui un courant en sens contraire ou dans le même sens.

2° Cas de deux fils conducteurs repliés en rectangles ou en cercles de même grandeur capables de se mouvoir autour du même axe dans des plans verticaux et disposés d'abord de manière que leurs deux plans soient perpendiculaires l'un à l'autre; ils viennent s'appliquer l'un contre l'autre, quand ils

font partie d'un circuit électrique, de manière que les courants aient la même direction dans tous les deux. Cas correspondant de deux conducteurs semblables, l'un fixe parcouru par un courant, l'autre mobile dans lequel il se développe un courant dirigé en sens contraire de celui du fixe quand on l'applique mécaniquement contre lui.

3° Cas d'un conducteur rectiligne mobile et limité, susceptible de se mouvoir parallèlement à lui-même tout le long d'un conducteur rectiligne indéfini; lorsqu'ils sont tous les deux parcourus par un courant, le mobile se meut le long du fixe dans le sens du courant de celui-ci, si son propre courant s'en éloigne, et en sens contraire, s'il s'en rapproche. Cas correspondant d'un conducteur indéfini et fixe parcouru par un courant le long duquel on fait mouvoir mécaniquement un conducteur mobile limité; il s'y développe un courant dirigé vers le conducteur indéfini quand il chemine dans le sens du courant de ce conducteur, et un courant dirigé en sens contraire quand il chemine dans une direction opposée à celle du courant du conducteur indéfini.

4° Cas d'un aimant dirigé du sud au nord et d'un conducteur parallèle à l'axe de l'aimant auquel on donne un mouvement angulaire tantôt à l'est, tantôt à l'ouest; il s'y développe un courant d'induction dirigé en sens contraire de celui qui devrait traverser le conducteur pour que celui-ci imprimât à l'aimant une déviation dans la même direction que celle qu'on lui donne mécaniquement.

5° Cas d'un anneau ou d'une hélice formée d'un fil métallique qu'on fait marcher jusqu'au milieu d'un aimant qui en forme l'axe; il s'y développe un courant dirigé en sens inverse de celui qui devrait parcourir le fil de l'anneau pour que celui-ci fût attiré jusqu'au milieu de l'aimant quand on présenterait le pôle de cet aimant au centre de l'anneau mobile.

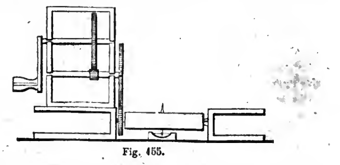
6° Cas d'un disque de métal se mouvant circulairement dans un plan horizontal entre les pôles d'un aimant en fer-à-cheval, dont l'un est dessus et l'autre dessous; il s'y développe un courant, allant du centre à la circonférence, quand le disque chemine dans le sens des aiguilles d'une montre et que

le pôle nord de l'aimant se trouve dessus et le sud dessous; le courant a un sens inverse si le disque chemine dans le sens opposé ou si les pôles de l'aimant sont renversés. Cette expérience correspond dans l'électro-dynamique à celle de Barlow dans laquelle une roue traversée par un courant électrique qui va de son centre à sa circonférence, tourne entre les pôles d'un aimant (fig. 110, p. 250). Le courant induit a une direction opposée à celle qu'aurait le courant qui donnerait à la roue un mouvement ayant lieu dans le même sens que celui qu'on lui imprime mécaniquement.

7° Cas d'un aimant qui tourne sur son axe sous l'action d'un courant qui va du milieu à l'une de ses extrémités ou de l'une de ses extrémités au milieu; l'aimant marche par l'effet des courants du mercure dans lequel il plonge ou des conducteurs fixes qui le mettent dans le circuit électrique (fig. 105 et 106, p. 243). Cas correspondant d'un aimant dont on fait communiquer l'un des pôles et le milieu avec les bouts d'un galvanomètre. En imprimant à l'aimant un mouvement de rotation sur son axe, on obtient au galvanomètre un courant dirigé en sens contraire de celui qui, traversant des conducteurs disposés par rapport à l'aimant comme le sont les bouts du fil du galvanomètre, imprimait à l'aimant un mouvement sur son axe ayant la même direction que celui qu'on lui imprime mécaniquement.

Cette dernière expérience est de Faraday, qui avait été amené à croire qu'on pouvait développer un courant induit dans la substance métallique de l'aimant même qui sert à produire l'induction. Weber avait également décrit sous le nom d'*induction unipolaire* une expérience qui ne diffère de celle de Faraday qu'en ce que l'aimant disposé de manière à pouvoir tourner autour de son axe horizontal, porte un disque métallique à travers lequel il passe à frottement juste et qui peut glisser de façon à être placé sur les différentes sections de l'aimant. Ce disque plonge par sa partie inférieure dans un godet plein de mercure où aboutit l'un des bouts du galvanomètre, pendant que l'autre communique avec l'axe de l'aimant lui-même (fig. 155). En faisant tourner l'aimant sur son axe on

obtient un courant continu, dont le sens dépend de celui de la rotation et dont l'intensité varie proportionnellement avec la


Fig. 155.

vitesse de cette rotation. Mais l'intensité absolue de ce courant dépend aussi essentiellement de la force de l'aimant et surtout de la distribution qu'y affecte le magnétisme, car elle change beaucoup suivant que l'aimant qui sert à l'opération est soumis ou non à ses deux extrémités, à l'action des pôles contraires de deux forts aimants auxiliaires qui en sont rapprochés. La longueur du trajet sur la surface de l'aimant, et parallèlement à son axe, n'influe pas d'une manière sensible sur la force du courant. Cette force est en effet la même lorsque, le disque de laiton étant fixé à l'une ou à l'autre des deux extrémités de l'aimant, le bout du galvanomètre qui ne communique pas avec le disque est mis en contact avec l'extrémité nord ou avec l'extrémité sud, c'est-à-dire avec celle qui est la plus rapprochée ou avec celle qui est la plus éloignée du disque. Toutefois l'effet absolu est moins considérable dans ce cas qu'il ne l'est lorsque le disque de laiton est au milieu de l'aimant.

Ces diverses expériences ne prouvent nullement, comme Faraday et Weber semblaient d'abord l'avoir admis, que les courants d'induction, dont le galvanomètre donne perception, sont produits sur la surface de l'aimant ou sur l'enveloppe métallique qui le recouvre et qui tourne avec lui. En effet, dans le mouvement de rotation l'axe et les pôles de l'aimant conservent constamment la même position relative par rapport à tous les points de sa surface ; par conséquent le fait du mouvement absolu imprimé à l'aimant ne doit produire aucun effet et ne

peut, en particulier, y développer de courant induit. C'est donc uniquement dans les portions du conducteur qui ne participent pas au mouvement de l'aimant et qui servent à établir la communication avec le galvanomètre qu'est développé le courant induit qui achève son circuit dans l'aimant. C'est de la même manière que la rotation de l'aimant sur son axe sous l'action de courants électriques qui le traversent n'est produite, comme nous l'avons vu, que par l'action de la partie du circuit qui est fixe et indépendante de l'aimant, et nullement par celle dont fait partie l'aimant lui-même et les conducteurs qui lui sont liés. La loi de Lenz rend très-bien compte de ces effets qui en sont l'une des conséquences, comme nous l'avons vu, dans l'examen du septième cas.

Cette loi, du reste, a encore ceci de remarquable, c'est la liaison qu'elle établit entre la nature du mouvement électro-dynamique et celle du courant induit correspondant. En effet, toutes les fois que l'action mutuelle de deux courants ou d'un courant et d'un aimant donne naissance à un mouvement limité tel qu'une attraction ou une répulsion, ou à une déviation dans un sens ou dans un autre, l'action inductrice correspondante détermine un courant instantané, tandis que, lorsque l'action électro-dynamique produit un mouvement continu tel qu'une rotation, l'action inductrice correspondante développe un courant continu. Ainsi les courants induits des cas 1°, 2° 4° et 5° sont instantanés, soit dans un sens, soit dans un autre, tandis que les courants des cas 3°, 6° et 7°, sont continus et dirigés conformément à la loi.

Dernièrement encore Faraday, en vue d'étudier le champ magnétique, c'est-à-dire la distribution des forces qui émanent extérieurement des pôles d'un aimant, a obtenu, en faisant tourner des conducteurs sous l'influence d'un aimant ou du magnétisme terrestre, des effets d'induction qui sont une confirmation remarquable de la loi de Lenz. Nous reviendrons sur ces expériences dans le chapitre suivant quand nous parlerons des lignes de force magnétique de Faraday; pour le moment, nous nous bornerons au point particulier de l'induction. Voici comment on l'obtient dans ce cas. Deux aimants sont disposés

l'un à côté de l'autre avec leurs pôles homogènes situés vers la même extrémité, de façon qu'ils peuvent agir comme un aimant unique et tourner autour d'un axe commun. Un fil métallique partant de l'un des bouts polaires suit la direction de l'axe jusqu'au milieu du système magnétique (c'est la partie *axiale*), et là, prenant une direction perpendiculaire à l'axe (c'est la partie *radiale*), revient à son point de départ en décrivant une ligne courbe plus ou moins longue qui est complétement extérieure aux aimants. Ces différentes parties du fil peuvent avoir des mouvements indépendants, mais elles communiquent métalliquement entre elles au moyen d'anneaux de cuivre auxquels aboutissent les extrémités de la partie axiale, et contre lesquels viennent s'appuyer les extrémités des parties radiales. On peut imprimer le mouvement aux aimants autour de leur axe commun, et alors le fil inducteur reste fixe; au lieu d'imprimer le mouvement à ce fil, ce sont les aimants qui sont mobiles. Lorsque l'on met en mouvement dans le même sens la partie radiale et la partie extérieure, c'est-à-dire toute la partie du fil conducteur comprise entre les deux points où il aboutit à l'axe, il n'y a pas la moindre trace de courant, ce qui provient de ce qu'il y a deux courants égaux et contraires développés, l'un dans la partie radiale, l'autre dans la partie extérieure; il est facile de s'en assurer en faisant mouvoir chacune de ces parties séparément. Quand c'est la partie axiale du fil qu'on fait mouvoir seule, il n'y a aucun effet, cette partie n'agit donc que comme conducteur, rôle que la matière de l'aimant peut remplir également. La nullité d'effet que nous venons de signaler s'accorde tout à fait avec l'une des conséquences des lois de l'électro-dynamique, exposée par Ampère, dans l'un de ses derniers mémoires; savoir, que l'action d'un aimant sur un courant fermé qui aboutit à son axe par ses deux extrémités est parfaitement nulle, et cela quelles que soient la forme et l'étendue de la courbe que le courant décrit et quels que soient les points de l'axe où aboutissent les extrémités du fil qui conduit le courant. Or, il en est de même exactement dans l'expérience de Faraday.

Cette correspondance si remarquable entre les phénomènes

de l'électro-dynamique et ceux de l'induction magnéto-électrique qui se retrouve dans chaque fait particulier a naturellement conduit les physiciens à chercher à les comprendre dans une même théorie. Weber, considérant le cas de deux conducteurs traversés chacun par un courant, y voit quatre forces : deux attractives et deux répulsives, vu qu'il regarde chaque courant comme composé de deux courants élémentaires, l'un d'électricité positive, l'autre de négative; calculant, d'après cette donnée, l'action électro-dynamique de deux éléments, il trouve pour la résultante des quatre forces une formule semblable à celle qu'Ampère avait obtenue pour représenter l'action mutuelle de deux éléments de courant. Il fait ainsi rentrer dans les lois de l'attraction et de la répulsion de l'électricité statique les phénomènes de l'électricité dynamique. Cette idée avait été déjà mise en avant, en 1822, par le professeur Prevost, de Genève, qui avait cherché à expliquer d'une manière fort ingénieuse, par les attractions et les répulsions électriques ordinaires, l'action mutuelle de deux courants électriques, en montrant que l'action mutuelle des courants élémentaires qui vont en sens contraire doit l'emporter sur celle des courants qui vont dans le même sens; que par conséquent, dans deux conducteurs traversés par des courants dirigés dans le même sens, l'attraction du courant élémentaire positif de l'un sur le courant élémentaire d'électricité négative de l'autre, doit l'emporter sur la répulsion mutuelle des deux courants élémentaires d'électricité positive et des deux courants élémentaires d'électricité négative; d'où il résulte en définitive une action attractive. L'inverse a lieu quand les deux courants sont dirigés en sens contraire dans les deux conducteurs.

Maintenant pour expliquer l'induction, M. Weber suppose qu'un élément de conducteur sans courant se meut en présence d'un conducteur immobile parcouru par un courant : les mêmes quatre forces agissent ici; seulement la vitesse des électricités dans le conducteur induit, au lieu d'être celle d'un courant, est celle du conducteur lui-même; elle est ainsi la même et a lieu dans le même sens pour les deux fluides électriques, au lieu d'être en sens contraire comme dans l'induc-

teur. Dans ce cas la formule donne pour l'action électro-dynamique une résultante nulle, ce qui doit être puisqu'il n'y a pas production de mouvement mécanique; mais si on calcule l'énergie avec laquelle l'élément inducteur tend à séparer les deux fluides électriques dans l'induit, on trouve qu'elle est exprimée par la différence entre les deux forces égales et contraires auxquelles sont soumises, de la part de l'inducteur, chacune des électricités de l'induit; forces dont la somme ou la résultante est nulle, comme nous venons de le voir, mais dont la différence est 2 f, en appelant l'une $+f$, et l'autre $-f$. Si l'on décompose cette force 2 f en deux autres, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au fil induit, la première est détruite, la seconde, que M. Weber appelle *force électro-motrice*, produit un courant qui dure tant qu'a lieu le mouvement du fil; c'est le courant d'induction. M. Weber a observé, en outre, et vérifié plusieurs lois expérimentales, et s'accorde parfaitement avec Neumann en ce qui concerne l'induction exercée par un circuit fermé, la seule d'ailleurs qu'on puisse observer directement.

Neumann était parvenu à calculer cette dernière action en partant d'un point de vue moins théorique que Weber; savoir simplement que l'action électro-dynamique et l'action inductrice sont assez liées l'une à l'autre, soit quant à leur valeur, soit quant à leur sens, pour qu'on puisse supposer que la force électro-motrice produite par le mouvement d'un élément induit est proportionnelle à l'action électro-dynamique qu'il recevrait de l'inducteur, décomposée, suivant la direction de sa vitesse, et multipliée par celle-ci. Il est assez remarquable que Weber soit arrivé au même résultat par un tout autre ordre d'idées, et on peut en conclure la loi suivante qui n'est plus une simple loi empirique, mais bien une loi mathématique, savoir, *que quelle que soit la cause et l'action électro-dynamique de deux courants, si pour expliquer l'induction subie par un conducteur en mouvement, on le considère comme un courant où les deux électricités cheminent dans le même sens, il est évidemment naturel de supposer qu'alors la force électro-motrice est proportionnelle à la force électro-dynamique exercée par l'inducteur sur un courant ayant cette même direction.*

Sans recourir à des notions et à des calculs aussi profonds que Weber et Neumann, j'estime qu'on peut considérer l'induction comme le résultat de la décomposition par influence de l'électricité naturelle de chaque particule du conducteur induit, par les électricités déjà séparées de chaque particule correspondante de l'inducteur. Pour cela, il faut admettre que la propagation du courant se fait par une série de décompositions et de recompositions des électricités des molécules successives, de la même manière que lorsqu'il s'agit des corps isolants, comme nous l'avons vu dans le chapitre VI de la deuxième partie[1]; nous exposerons dans la quatrième partie les preuves nombreuses qui militent en faveur de ce mode de propagation du courant électrique.

Soit donc AB (fig. 156) un conducteur traversé par un courant

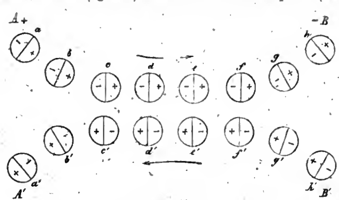


Fig. 156.

rant dans la direction de A en B; les particules successives dont il se compose ont leur électricité naturelle décomposée, les — tournés du côté de A où est le pôle positif de l'appareil et les + tournés vers B où est le pôle négatif. Les électricités, dès qu'elles ont été séparées, se combinent de particule à particule, savoir : la négative de *a* avec la positive du pôle A, la négative de *b* avec la positive de *a*, et ainsi de suite jusqu'à la positive de *h* qui se combine avec la négative du pôle B. Cette recomposition, qui est instantanée, est immédia-

[1] Voyez page 135.

tement suivie d'une nouvelle décomposition, et celle-ci d'une recomposition, et ainsi de suite. Cette succession de décompositions et de recompositions est tellement rapide, qu'il y a toujours, ainsi que l'expérience le démontre, une tension électrique dans chaque particule du conducteur, de sorte qu'on peut regarder que l'état dans lequel il est représenté dans la fig. 156, que nous appellerons *état de polarisation*, est à peu près permanent.

Soit maintenant un second conducteur A'B' (fig. 156) semblable au premier, aussi rapproché que possible de lui, tout en étant isolé par de la soie ou de la cire; au moment où l'on fait passer un courant dans AB et où l'on polarise par conséquent ses particules, on produit dans A'B' une polarisation moléculaire opposée, le + de chaque particule étant vis-à-vis du — de chaque particule de AB et le — devant le +. Il en résulte que si, au moment où AB est envahi par un courant, les deux extrémités de A'B' sont réunies par un conducteur, tel que le fil d'un galvanomètre, le + de la molécule *a'* se combine, à travers ce conducteur, avec le — de la molécule *h'*, et produit ainsi un courant instantané dirigé de A' à B' dans le conducteur de B' à A' dans le fil A' B' lui-même, c'est-à-dire en sens contraire du courant inducteur. De même si, au lieu d'être réunies par un conducteur, les extrémités A' et B' communiquent avec les deux plateaux d'un condensateur, A' lui donne une charge d'électricité positive et B' une de négative. Dès que *a'* a perdu son électricité positive et *h'* sa négative, la négative de *a'* se trouve dissimulée par la positive de *b'*, et ainsi de suite jusqu'à la négative de *g'*, qui est dissimulée par la positive de *h'*; ces électricités ne se neutralisent pas, parce qu'elles sont retenues par les électricités opposées des particules de AB; mais au moment où le courant cesse de passer par AB, alors si les deux extrémités de A'B' sont unies par un conducteur, l'électricité négative de *a'* se réunit avec la positive de *h'*, et en même temps les extrémités contraires de chacune des particules *a'*, *b'*, *c'*, *d'*, *e'*, *f'* et *g'* se combinent, et il en résulte un courant qui va dans le conducteur de B' en A' et de A' en B' dans le fil A'B' lui-même. Ainsi A'B' est traversé, dans ce cas,

par un courant dirigé dans le même sens que le courant inducteur. L'état de tension électrique dans lequel se trouve le fil A'B' pendant que le courant traverse AB est celui que Faraday avait appelé *électrotonique ;* et la cessation de cet état produit le second courant d'induction, tandis que sa création avait produit le premier. On conçoit, d'après la théorie qui précède, que la tension électrique des molécules extrêmes sera d'autant plus forte que le fil induit sera plus long; car s'il est court, les deux électricités accumulées à ses deux extrémités se réuniront plus facilement à travers le fil lui-même; d'un autre côté, pour produire un fort courant, il faut qu'il soit bon conducteur, afin que la décomposition des électricités naturelles de chacune de ses particules et leur recomposition se fassent plus facilement, et par conséquent plus vite et en plus grande proportion. Au fond, dans la théorie que nous venons de donner, la production des deux courants instantanés d'induction est tout à fait semblable à ce qui se passe dans la charge et la décharge par cascade de plusieurs bouteilles de Leyde consécutives, dont l'armure intérieure de chacune communique avec l'extérieure de la précédente.

On sait qu'on peut, au lieu de développer le courant induit en faisant passer un courant dans l'inducteur, le produire en rapprochant ou en éloignant mécaniquement AB traversé par le courant, de A'B' qui ne l'est pas; on obtient alors un courant induit d'autant plus fort que le mouvement mécanique s'opère plus rapidement, mais cependant jamais aussi fort que dans le premier cas, toutes les autres circonstances étant les mêmes. Il est vrai qu'alors le courant a un peu plus de durée. Dans ce cas les molécules de A'B' ne subissent pas brusquement, comme dans le cas de l'invasion de AB par le courant, l'influence polarisante des molécules *a*, *b*, *c*, etc. ; aussi, au lieu d'un seul courant assez énergique et instantané, on obtient une série de petits courants instantanés dont l'intensité augmente à mesure que le rapprochement s'opère, et dont la somme constitue un courant temporaire.

Lorsqu'au lieu d'opérer l'induction par le courant électrique, on l'opère par un aimant, la théorie est exactement

la même, pourvu qu'on se rappelle qu'un aimant peut être assimilé à un assemblage de courants tous dirigés dans le même sens et perpendiculairement à l'axe de l'aimant; seulement l'action du courant de l'aimant est beaucoup plus énergique que celle de véritables courants électriques, ce qui tient probablement à leur grand nombre.

Il nous reste à examiner le cas où l'inducteur et l'induit ayant un mouvement continu l'un par rapport à l'autre, le courant d'induction se trouve être aussi continu; la même théorie rend également bien compte des effets. Supposons le conducteur AB (fig. 157) traversé par un courant de B en A, se

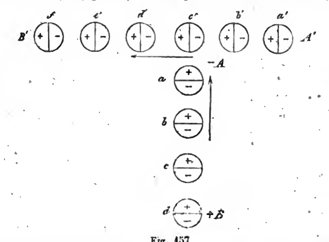


Fig. 157.

mouvant le long du conducteur indéfini A'B'; le + de la molécule *a* de AB, cheminant de A' en B', décompose l'électricité naturelle de chacune des particules *a*, *b*, *c*, *d*, etc., devant lesquelles il passe : il attire le — et repousse le +, ce qui donne immédiatement naissance à un courant dirigé vers B' et allant de B' en A' dans un conducteur qui réunirait les deux extrémités de A'B'; ce courant se reproduit chaque fois que *a* passe devant une molécule de A'B', et par conséquent tant que dure le mouvement de AB devant A'B'. Le sens de ce courant est bien conforme à ce qu'il doit être d'après la loi de Lenz, car il est inverse de celui qui donnerait à AB un mouvement

ayant la même direction que celle du mouvement mécanique qu'on lui imprime; mais l'intensité en est très-faible, ce qui tient à ce qu'il n'y a que les particules extrêmes de AB, celles qui sont très-rapprochées de A'B', qui puissent agir sur lui [1].

Quant au courant induit dans l'inducteur lui-même, qui a lieu au moment où le courant cesse de passer, il est tout simplement l'effet du retour des molécules à leur état ordinaire, quand la polarisation moléculaire vient à cesser. En effet, supposons que dans le fil AB de la figure 156 on supprime le passage du courant et qu'en même temps on réunisse A et B par un conducteur, l'électricité positive de *h* se réunira à travers ce conducteur avec la négative de *a*, la positive de *a* avec la négative de *b*, et ainsi de suite; on aura ainsi un courant dirigé de B en A dans le conducteur, et de A en B dans le fil lui-même, et par conséquent dans le même sens que celui qui le traversait, mais seulement il sera instantané. Il est facile de comprendre pourquoi, lorsqu'on recueille l'extra-courant, le courant induit dans le fil A'B' cesse presque complétement : cela tient à ce que le sens dans lequel cheminent les électricités des molécules de AB entraîne celles de A'B' dans un sens contraire à celui qui donnerait lieu au courant induit.

Les expériences nombreuses de M. Masson, relatives à l'induction du courant sur lui-même, sont tout à fait favorables à l'explication que je viens de donner de la production de l'extra-courant [2].

Un point assez important de notre théorie, c'est l'explication

[1] M. Wartmann avait même cru qu'il n'y avait pas production du courant d'induction dans le cas où le fil induit serait perpendiculaire au fil induit; son erreur provient de ce que le courant est très-faible, et peut-être aussi de ce que M. Wartmann avait opéré avec des conducteurs qui se croisaient, tandis qu'il faut que l'un des fils soit en entier du même côté de l'autre, comme dans la figure 157.

[2] La forme d'hélice donnée au conducteur favorise à longueur égale, d'une manière très-prononcée, la production de l'extra-courant. Cela tient à ce qu'à la cause que nous venons d'assigner à cette production, et qui agit seule dans le cas d'un conducteur rectiligne, se joint ici l'action inductrice de chaque spire de l'hélice sur les spires voisines dont l'effet doit s'ajouter à celui de la cause générale, puisqu'il s'exerce dans le même sens au moment où le courant cesse de

qu'elle donne de l'influence qu'exerce sur l'intensité du courant induit la vitesse avec laquelle on rapproche le conducteur mobile du fixe. Si ce rapprochement a lieu trop lentement, la polarisation moléculaire du conducteur induit se détruit à mesure qu'elle s'opère, sans pouvoir donner naissance à un courant sensible; il faut pour qu'un courant soit produit que le + de l'une des deux molécules extrêmes de l'induit se combine par l'intermédiaire des conducteurs qui les unit avec le — de l'autre molécule extrême, ce qui nécessite un mouvement rapide sans lequel le + et le — de chaque particule se combinent ensemble aussitôt qu'ils ont été séparés. Cette influence de la vitesse a été appréciée par M. Wartmann qui a réussi, même en rapprochant jusqu'au contact, mais très-lentement, une armure de fer doux d'un aimant, à n'avoir aucun courant d'induction dans le fil qui entourait l'armure; il a pu obtenir le même résultat en remplaçant l'aimant par des courants électriques. D'un autre côté, j'avais déjà, en 1837, montré, en employant une machine de Saxton (fig. 145), l'augmentation d'intensité dans les effets des courants d'induction qui résulte de l'accroissement dans la vitesse de rotation de l'armure de fer doux devant les pôles de l'aimant, augmentation qui tenait non-seulement à ce que, dans un temps donné, il y avait un plus grand nombre de courants d'induction produits, mais aussi à ce que chacun d'eux était individuellement plus fort. Ainsi, quand la vitesse était telle qu'il y avait 28 courants induits par seconde, il n'en fallait que 462 pour dégager la même quantité de gaz qui en exigeait 1050 quand il

passer. C'est par la même raison que l'introduction d'un barreau de fer doux dans l'intérieur de l'hélice favorise la production de l'extra-courant. L'excellente analyse que M. Masson a faite de ses propres recherches, de celles de Jenckins et de celles de Faraday sur l'extra-courant, établissent une analogie très-remarquable entre la force du courant et la décharge d'une bouteille de Leyde, analogie que Faraday avait déjà constatée pour les courants d'induction ordinaires, ce qui s'accorde très-bien avec l'explication que nous avons essayé de donner de la production de ces courants. Au reste, nous reviendrons sur ce sujet, et en particulier sur les recherches de M. Masson, quand nous étudierons les effets physiologiques des courants d'induction auxquels ce physicien a consacré une grande partie du travail dont nous venons de parler.

n'y en avait que 14 par seconde. En mettant dans le circuit des courants induits l'hélice du thermomètre métallique de Breguet, on voyait cette hélice se maintenir à 70° quand il y avait 2 courants d'induction par seconde, à 55° quand il y en avait 10, à 100° quand il y en avait 20, et à 133° quand il y en avait 40. Ici on n'a point trouvé de limite à l'augmentation d'intensité résultant de l'accroissement de vitesse, tandis qu'on arrive assez vite à en trouver une quand il s'agit du dégagement gazeux, ce qui tient à ce que la surface des électrodes recevant successivement l'oxygène et l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau, puisque les courants induits sont alternativement dirigés dans un sens et dans un autre, il en résulte que si ces gaz se succèdent très-rapidement, ils se recombinent en grande partie pour former de l'eau, et par conséquent ne se dégagent pas dans le tube du voltamètre.

M. Lenz a reconnu qu'il peut y avoir un maximum dans l'intensité du courant qui n'est point uniquement une fonction de la vitesse de rotation de la machine magnéto-électrique. Ainsi il a trouvé, comme je l'avais aussi remarqué moi-même, que la manière dont les fils conducteurs sont unis entre eux, et la résistance du système que le courant doit traverser, déterminent le maximum de l'induction pour des vitesses très-différentes. Si, par exemple, on lie l'un à l'autre les fils de six bobines, de manière que leur longueur totale soit parcourue par le courant induit, une vitesse modérée suffit déjà pour obtenir l'induction maximum; il n'en est plus de même si les six bobines sont séparées de façon que chacune d'elles ne soit plus traversée que par la sixième partie du courant qui se partage entre elles; alors on arrive, en augmentant beaucoup la rapidité de la rotation, à obtenir un courant qui a une force dix fois plus grande que dans le premier cas. M. Lenz croit que ce maximum tient à l'aimantation secondaire que les courants induits impriment à leur tour aux masses de fer mêmes, à l'aimantation desquelles ils doivent leur origine.

L'influence de l'aimantation se fait sentir sous un autre rapport non moins important; c'est le temps plus ou moins long, mais jamais nul, qu'il faut au fer doux pour s'aimanter et se

désaimanter; il en résulte que, suivant la longueur de ce temps qui dépend de la nature du fer, on atteint le maximum d'induction avec des vitesses plus ou moins grandes. C'est aussi là la cause de la durée finie et non tout à fait instantanée, quoique très-courte, des courants induits par l'aimantation; ces courants, que nous avons appelés *temporaires*, ont pour caractère de pouvoir agir sur l'aiguille aimantée, tandis que les instantanés proprement dits n'agissent pas sur l'aiguille, mais produisent des commotions et l'aimantation comme les décharges électriques. Parmi les causes qui déterminent la production de l'une ou l'autre de ces deux espèces de courants, nous pouvons signaler, outre celles qui tiennent à leur origine, la nature du circuit qu'ils doivent parcourir, qui peut rendre instantané un courant qui serait naturellement temporaire. Ainsi, par exemple, si le circuit renferme un conducteur imparfait, tel que le corps humain, le courant induit, au lieu de s'écouler à mesure qu'il est produit, n'est lancé qu'à l'instant où il a acquis l'intensité nécessaire pour traverser ce conducteur imparfait, et par conséquent se trouve devenir tout à fait instantané de temporaire qu'il était auparavant. Les expériences de M. Dove, que nous avons rapportées plus haut [1], nous fournissent plusieurs preuves de ces changements.

Nous aurions encore beaucoup à dire sur les propriétés des courants induits; mais comme ces propriétés ne sont pas spécifiques, c'est-à-dire qu'elles ne tiennent pas à la nature même de ces courants, mais uniquement aux circonstances dans lesquelles ils sont produits, à leur alternative et à leur discontinuité; que, par conséquent, on peut les observer avec des courants d'origine quelconque placés dans les mêmes conditions, nous renvoyons l'étude de ces propriétés au moment où nous nous occuperons des effets des courants électriques en général. Nous nous bornerons seulement à citer encore, en terminant ce chapitre, quelques lois remarquables observées par M. Wartmann en ce qui concerne les courants d'induction; mais comme ces lois sont pour la plupart liées à la conductibilité électrique,

[1] Voyez pages 430 et suivantes.

nous ne nous occuperons que de celles qui sont plus spécialement propres à l'induction, renvoyant pour les autres au chapitre qui a pour objet, dans notre quatrième partie, l'étude du pouvoir conducteur des corps pour l'électricité; nous aurons également l'occasion de revenir sur plusieurs des observations que M. Wartmann a faites en observant dans leurs détails les phénomènes de l'induction.

M. Wartmann a étudié successivement l'induction d'un fil constant par un fil variable et celle d'un fil constant par deux fils dont l'un est variable. Il a trouvé, au moyen d'un grand nombre d'expériences, que dans le premier cas, *pour des longueurs de fil additionnel croissant, en progression géométrique, les intensités du courant induit mesurées au galvanomètre, diminuent en progression arithmétique*. Dans le second cas, qui se subdivise lui-même en plusieurs, M. Wartmann est arrivé à reconnaître que *les déviations galvano-métriques qui mesurent les intensités des courants induits par deux fils inducteurs sont en général la somme ou la différence des courants induits par chacun des fils séparément*. Quant à l'influence de l'allongement de l'un des fils inducteurs, elle est soumise à la même loi que dans le cas où il n'y a qu'un fil; c'est toujours une diminution dans les effets induits suivant les termes d'une progression arithmétique pour une augmentation de longueur du fil additionnel suivant les termes d'une progression géométrique; seulement la raison de l'une et de l'autre progression varie suivant les circonstances de l'expérience et la nature de la dimension du fil additionnel employé. Comme on le voit, les lois de Wartmann sont l'expression complexe de deux ordres de phénomènes, l'influence que peut avoir sur l'intensité du courant inducteur la présence d'un fil additionnel plus ou moins long, influence qui se rattache à la conductibilité électrique, et l'effet que cette circonstance peut exercer sur l'action inductrice du courant inducteur, qui tient aux phénomènes mêmes de l'induction.

Malgré les développements que nous avons donnés au sujet important de l'induction électro-dynamique, nous avons été obligés de passer sous silence bien des détails intéressants. Plusieurs de ces détails trouveront, il est vrai, leur place plus

loin, dans les chapitres où nous nous occuperons des effets lumineux, calorifiques, chimiques et surtout physiologiques des courants induits. Ainsi nous n'avons point parlé de l'appareil d'induction de M. Neef fondé également, comme celui que nous avons décrit (p. 392, fig. 148), sur l'emploi de l'aimantation et de la désaimantation du fer doux pour rendre le courant discontinu; mais nous décrirons cet appareil quand nous parlerons des expériences curieuses sur la lumière électrique et sur les secousses électro-physiologiques auxquelles il a donné naissance entre les mains de M. Neef[1].

[1] Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Arago. — Magnétisme par rotation. — *Annales de chimie et de physique.* T. XXXVII (1825), p. 363; t. XXVIII (1825), p. 325, et t. XXXII, (1827), p. 213.

Babbage et *Herschell* — Idem. — *Bibl. univ.* T. XXIX (1825), p. 354.

Harris. — Idem. — *Bibl. univ.* T. XLVII (1831), p. 134.

Christie. — Idem. — *Bibl. univ.* T. XXIX (1825), p. 254.

Ampère et *Colladon.* — Idem. — *Mém. de l'Acad. des sc.* (1827), et *Bulletin de Férussac.* T. VI (1826), p. 241.

Haldat. — Idem. — *Ann. de chim. et de phys.* T. XXXIX (1828), p. 232, et t. LXVII (1838), p. 203.

Barlow. — Idem. — *Bibl. univ.* T. XXXIV (1827), p. 188.

Poisson. — Idem. — *Ann. de chim. et de phys.* T. XXXII (1826), p. 225.

Faraday. — Courants d'induction. — *Transactions philosophiques de* 1832 *et* 1833. — *Bibl. univ.* T. XLIX (1832), p. 341, et t. LIX (1835), p. 128. — *Ann. de chim. et de phys.* T. L (1832), p. 5 et 113, et t. LI (1831), p. 404.

Henry. — Extra-courants et induction de divers ordres. — *Archiv. de l'électric.* T. II, p. 350, et t. III, p. 484. — *Ann. de chim. et de phys.* (nouvelle série). T. III, p. 394.

Breguet et *Masson.* — Induction. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. IV, p. 129.

Masson. — Induction d'un courant sur lui-même. — *Ann. de chim. et de phys.* T. LVI, p. 5.

Nobili et *Antinori.* — Idem. — *Ann. de chim. et de phys.* T. XLVIII (1832), p. 412.

Matteucci. — Magnétisme de rotation. — *Archiv. des sc. phys. et nat.* T. XXIII, p. 39. — Induction par les décharges. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. IV, p. 153, et *Archiv. de l'électric.* T. V, p. 530.

Pixii. — Machine magnéto-électrique. — *Ann. de chim. et de phys.* (1832), p. 76.

Marianini. — Induction par les décharges. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.).

T. x, p. 491, et t. xi, p. 385.

Riess. — Idem. — *Ann. de chim. et de phys.* T. LXXIV (1840), p. 158, et *Archiv. de l'électric.*

Verdet. — Idem. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S). T. XXIV, p. 377.

Knochenhauer. — Idem. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. XVII, p. 130.

Dove. — Influences diverses sur l'induction. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. IV, p. 336. — *Archiv. de l'électric.* T. II, p. 290, 315 et 338; t. III, p. 49 et 63; t. IV, p. 331.

Lenz. — Théorie de l'induction et propriétés des courants induits. — *Ann. de Poggendorff.* T. XXXI de la nouvelle série (1834), p. 483; t. XXXIV, p. 385, et t. XLVIII, p. 385.

Weber. — Induction unipolaire et théorie. — *Archiv. de l'élect.* T. V, p. 441. — *Électro-dynamische Maasbestimmengen.* Leipsig (1846).

Palmieri. — Induction par magnétisme terrestre. — *Archiv. de l'électric.* T. III, p. 341; t. IV, p. 172, et t. V, p. 181. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. VIII, p. 503.

Abria. — Induction de divers ordres et par décharges. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. III, p. 5, et t. VII p. 462.

Ampère. — Action d'un courant et d'un aimant. — *Ann. de chim. et de phys.* T. XXXVII. — Courants d'induction. — *Ann. de chim. et de phys.* T. XLVIII (1831), p. 405; (1828), p. 113.

Prévost, prof. — Théorie sur l'action des courants. — *Bibl. univ.* T. XXI (1821), p. 178.

Wartmann. Lois de l'induction. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. XIX, p. 257, 281 et 385; t. XXII, p. 5.

A. de la Rive. — Courants induits. — *Biblioth. univ.* T. IX (1838), p. 408, — *Archiv. de l'électric.* T. I, p. 175, et t. III, p. 159. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. VIII, p. 36. — *Mémoires de la soc. de phys. et d'hist. nat. de Genève.* T. VIII, p. 191; t. IX, p. 163, et t. XI, p. 225. — *Arch. de sc. phys. et nat.* T. I (1846), p. 373.

CHAPITRE VI.

ACTION DU MAGNÉTISME SUR TOUS LES CORPS.

§ 1. Action de l'aimant sur les corps non magnétiques autre que celle qui provient de l'induction.

L'une des circonstances qui ont constamment le mieux caractérisé le magnétisme, c'est sa spécialité, c'est-à-dire le petit nombre de corps capables d'être aimantés ou influencés par l'aimant. Le fer et l'acier, plus tard le nickel et le cobalt ont été longtemps considérés comme les seules substances susceptibles d'acquérir et de manifester des propriétés magnétiques. La découverte du magnétisme par rotation semblait d'abord devoir modifier cette manière de voir; mais le fait que le mouvement est nécessaire pour qu'il y ait action d'un corps quelconque sur l'aimant, suffit pour montrer qu'il ne s'agit pas ici d'une véritable action magnétique, puisque le corps en repos n'exerce aucun effet. D'ailleurs, l'explication du phénomène par la production des courants d'induction, le rattache à un tout autre ordre de faits.

L'universalité du magnétisme, c'est-à-dire la disposition de tous les corps, aussi bien que celle du fer, du cobalt et du nickel, à obéir à l'influence d'un aimant, doit, pour être démontrée, se manifester directement par une action continue exercée par un aimant en repos sur un corps également en repos. Autrement on peut toujours craindre que les actions que l'on prend pour des phénomènes magnétiques, ne soient simplement que des effets d'induction.

L'induction ou, pour mieux dire, les courants induits peuvent, en effet, donner lieu à des mouvements. Ainsi, par exemple, si je place au-dessus, mais entre les pôles d'un fort électro-aimant dont les deux branches sont verticales, un anneau de cuivre de 12 à 15 centimètres de diamètre, fait d'une

lame très-mince et large d'un centimètre, par conséquent très-léger et délicatement suspendu, je puis exciter chez lui des courants d'induction en aimantant et désaimantant l'électro-aimant au moyen d'un courant voltaïque; et j'ai la preuve de l'existence de ces courants par les mouvements que cet anneau exécute sous l'influence des pôles magnétiques. Ces mouvements deviennent encore plus sensibles si on entoure l'anneau d'une ceinture de courants voltaïques très-forts, transmis à travers un fil de cuivre recouvert de soie, faisant plusieurs circonvolutions circulaires. On le voit alors obéir à l'action de ces courants comme si lui-même faisait partie d'un circuit électrique, preuve que sous l'influence de l'électro-aimant il est traversé par un courant d'induction que son propre mouvement renouvelle à chaque instant. On peut, pour se convaincre que c'est à cette cause qu'il faut attribuer l'effet observé, couper l'anneau quelque part dans son pourtour, et réunir les deux bouts séparés par une substance isolante; il n'y a plus action parce que le courant ne peut plus circuler, ni par conséquent s'établir; mais aussitôt que les deux bouts se touchent en communiquant entre eux par un bon conducteur, l'action recommence [1].

Au reste, un physicien français, M. Lallemand, a réussi à démontrer directement que les courants instantanés, produits par l'induction, s'attirent ou se repoussent les uns les autres comme les courants continus et suivant les mêmes lois. Il a même observé que les courants tertiaires, qui ne produisent pas au galvanomètre de déviations appréciables, agissent très-vivement les uns sur les autres, soit par attraction, soit par répulsion. L'action du courant inducteur sur le courant induit présente quelques particularités remarquables que j'ai eu éga-

[1] Nous avions déjà, en 1822, observé, M. Ampère et moi, qu'un anneau circulaire fait d'une bande de cuivre mince, délicatement suspendu au milieu d'un anneau extérieur formé de plusieurs circonvolutions d'un fil de cuivre entouré de soie, se mettait en mouvement sous l'action des pôles d'un aimant en fer à cheval, au moment où un fort courant électrique traversait la ceinture de fil de cuivre. C'était évidemment un phénomène d'induction (*Ann. de Phys. et de Ch.* T. XXI. 1822, p. 222).

lement l'occasion de vérifier dans les expériences avec l'électro-aimant que je viens de rapporter plus haut. Le circuit mobile est énergiquement repoussé, quoiqu'il soit parcouru par les deux courants induits directs et inverses; il semblerait en résulter que le courant inducteur agit par répulsion sur les deux courants induits également; mais l'expérience faite avec les deux courants induits séparément montre qu'il y a bien répulsion quand le courant inverse passe, et attraction quand c'est le direct, comme cela doit avoir lieu d'après les lois d'Ampère; seulement la répulsion est plus énergique que l'attraction, ce qui explique le résultat de l'expérience précédente. Cette différence dans l'effet du même courant inducteur sur les deux courants induits, qui sont réellement égaux, provient de ce que le courant inducteur, pendant qu'il agit sur le courant inverse, augmente graduellement d'intensité, tandis que lorsqu'il agit sur le direct il diminue de même graduellement, la première action ayant lieu à l'établissement du circuit et la seconde à sa rupture. Il en résulte nécessairement que la première doit être plus forte que la seconde, car le courant inducteur agit sur le courant induit inverse pendant tout le temps de sa durée, ce qui n'a pas lieu pour le direct qui dure encore quelques instants après que l'inducteur lui-même a cessé. Du reste, l'action d'un courant sur l'un ou sur l'autre de ces courants induits est proportionnelle à son intensité, ce qui fournit une confirmation de la loi démontrée par M. Abria, qu'il y a un rapport constant entre l'intensité du courant inducteur et celle du courant induit.

On voit, d'après ce qui précède, avec quelle précaution il faut s'y prendre pour constater si un corps non magnétique est, oui ou non, susceptible d'être influencé par un aimant : car, dès qu'il y a mouvement, il y a production de courants induits, si du moins le corps est conducteur, et l'effet observé peut par conséquent être dû à l'induction. M. Faraday, comme nous le verrons plus loin, a fait une étude très-détaillée des mouvements qui résultent, dans les masses métalliques, de la production des courants d'induction qu'y détermine l'action de l'électro-aimant. Il est parvenu à très-bien distinguer les mou-

vements dus à cette cause de ceux qu'engendre l'action immédiate du magnétisme sur les diverses substances.

Coulomb, qui l'un des premiers a cherché à découvrir des traces de magnétisme dans les corps non magnétiques, avait trouvé qu'en donnant à ces corps la forme de petits barreaux de 5 à 6 millimètres de longueur et de 1/4 de millimètre d'épaisseur, et en les suspendant à un fil de soie sans torsion entre les pôles opposés de deux forts aimants, ils se mettaient dans la direction de ces aimants et que, si on les en détournait, ils y étaient toujours ramenés après des oscillations plus ou moins nombreuses. Cet effet était probablement dû à des quantités de fer excessivement petites, répandues indistinctement dans les corps et non à une propriété particulière de ces corps; telle était du moins l'opinion de Coulomb qui trouve, par exemple, que dans une petite aiguille d'argent soumise à l'expérience $\frac{1}{133000}$ de fer suffisait pour qu'elle éprouvât l'influence des aimants. Il est probable que c'était bien là l'origine des effets observés par Coulomb, quoique cependant il y ait bien une action propre exercée par les aimants sur tous les corps, mais cette action n'est pas la même sur tous; preuve que dans celle que nous venons de rapporter c'était bien la présence du fer qui était la cause prédominante du phénomène.

M. Becquerel avait obtenu longtemps après Coulomb, mais peu de temps après la découverte d'Oersted, des résultats curieux en soumettant différentes substances à l'action de courants électriques très-énergiques ou d'aimants très-puissants. Ayant observé qu'une aiguille de fer doux librement suspendue dans l'intérieur d'un galvanomètre, se place, comme on devait s'y attendre, perpendiculairement aux contours du fil, en vertu de l'aimantation qu'elle acquiert, il la remplaça par une petite cartouche pleine de limaille très-fine de fer doux qui se conduisit de même. Mais ayant rempli la cartouche de deutoxyde de fer, il trouva que les choses se passaient tout autrement. Cette cartouche d'un millimètre de diamètre, suspendue convenablement et soumise à l'influence du courant, fût attirée rapidement dans le plan de l'appareil, et après quelques oscillations, se plaça dans une direction parallèle aux contours du

fil. Si l'on présente le pôle d'un aimant à la cartouche de deutoxyde de fer pendant qu'elle est sous l'influence du courant du galvanomètre, on voit que ce pôle agit de la même manière sur tous les points qui sont situés du même côté du galvanomètre; le pôle de l'aimant étant changé, l'effet est inverse. Ainsi tout le magnétisme nord de la cartouche est d'un côté de son axe longitudinal, et tout le magnétisme sud est de l'autre, distribution du magnétisme inverse de celle qui a lieu ordinairement dans les corps magnétiques.

Des aiguilles en cuivre, en bois, en gomme laque, paraissent éprouver de la part du courant, le même genre d'action que les cartouches remplies de deutoxyde de fer, seulement à un degré bien moindre; mais l'effet est si peu marqué et l'expérience si délicate que les résultats peuvent en paraître douteux.

En soumettant ces diverses substances à l'action de forts aimants, M. Becquerel avait observé des effets analogues, c'est-à-dire qu'il avait trouvé que, dans les corps tels que l'acier et le fer doux, la distribution du magnétisme s'y fait toujours dans le sens de la longueur, tandis que, dans les autres, tels que le deutoxyde, le tritoxyde de fer, le bois, la gomme laque, elle s'y fait le plus souvent dans le sens de la largeur. Voici une expérience curieuse. Une aiguille en bois, de 4 centimètres de longueur, est placée entre deux pôles opposés de deux forts aimants, dont les extrémités sont à quelques millimètres de distance, et son point de suspension est le plus rapproché possible de l'intervalle qui les sépare. L'aiguille se place alors perpendiculairement à la ligne qui joint les pôles, au lieu de se mettre dans la direction de cette ligne, se conduisant ainsi comme la cartouche, qui renferme un mélange de deutoxyde et de tritoxyde de fer, ou seulement du tritoxyde. Mais si on éloigne les pôles du barreau, l'aiguille de bois finit par se placer suivant la ligne même des pôles. Une aiguille de gomme laque présente, mais à un moindre degré, le même phénomène. Il est impossible de reconnaître la polarité transversale avec ces diverses substances, comme on la reconnaît dans la cartouche de deutoxyde de fer ou dans celle qui renferme un mélange de deutoxyde et de tritoxyde.

Une autre forme remarquable, sous laquelle l'influence mutuelle du magnétisme et des corps non-magnétiques peut se manifester, est celle que M. Arago avait observée en faisant osciller une aiguille aimantée horizontale au-dessus de différentes substances non-conductrices de l'électricité, et où, par conséquent, les courants d'induction ne pouvaient s'établir. Ainsi, au-dessus d'un plan de glace (eau gelée), une aiguille aimantée, pour que sa déviation soit réduite de 53° à 43, fait

26	oscillations	à 0, mil.	70	de distance.
34	—	à 1,	26	—
56	—	à 30,	5	—
60	—	à 52,	2	—

Au-dessus d'un plan de verre (crown glass), une autre aiguille fait, pour réduire sa déviation de 90° à 41°,

122	—	à 0, mil.	91	de distance.
180	—	à 0,	99	—
208	—	à 3,	04	—
220	—	à 4,	01	—

Ces différences, si grandes dans le nombre des oscillations que fait la même aiguille dans les mêmes circonstances, mais à différentes distances du plan de glace ou de verre, semblent prouver l'influence mutuelle de chacune de ces substances et de l'aiguille aimantée.

Enfin un fait important est la répulsion, observée primitivement par Brugmanns, puis, plus tard, par Lebaillif, qu'exercent sur le pôle d'une aiguille aimantée le bismuth et l'antimoine. On avait bien cherché à ramener ce fait à une loi générale, c'est-à-dire à une répulsion mutuelle exercée entre les corps par l'effet de quelque rayonnement, tel que le rayonnement calorifique; mais l'expérience, faite avec soin, avait montré que la condition nécessaire du phénomène était que l'aiguille fût aimantée, et que, par conséquent, il dépendait du magnétisme et non des causes étrangères à cet agent.

Les faits que nous venons de rapporter semblaient prouver

que l'aimant exerce, sur les différents corps de la nature, une action qui n'est ni analogue à celle qu'il exerce sur les corps magnétiques, ni une action due à l'induction. Mais ces faits étaient isolés, fort peu nombreux; ils ne paraissaient soumis à aucune loi. C'est à Faraday qu'on doit de les avoir constatés d'une manière positive et de les avoir en même temps ramenés à un principe général.

Le savant physicien anglais, à la suite de recherches relatives à l'influence qu'exerce le magnétisme sur un rayon de lumière polarisée transmis à travers certaines substances transparentes placées sous l'action d'un fort électro-aimant, recherches dont nous parlerons plus loin, essaya de soumettre à l'action directrice de cet électro-aimant les mêmes substances transparentes, et il parvint ainsi à une découverte remarquable. La substance transparente, dont il fit principalement usage, et qui est la plus propre à la manifestation de ce genre de phénomènes, est un verre particulier d'une couleur jaunâtre, préparé par M. Faraday lui-même, en vue d'usages optiques, et qu'il avait nommé *verre pesant* à cause de sa grande densité; c'est un boro-silicate de plomb.

Un prisme de ce verre, de 5 à 6 centimètres de longueur sur une section d'un centimètre carré environ, est suspendu horizontalement, au moyen d'un fil de soie écrue, au-dessus et très-près des deux pôles d'un électro-aimant puissant, disposé de façon que ses deux branches soient verticales. Au moment où le courant électrique traverse le fil de l'électro-aimant, on voit le prisme de verre se mettre en mouvement et se placer, après un nombre plus ou moins grand d'oscillations, perpendiculairement à la ligne qui joint les deux pôles; position que M. Faraday appelle *équatoriale*, par opposition à celle que prennent les corps magnétiques, qui se placent suivant la ligne même des pôles, et qu'il appelle *axiale*. Si on le dérange de la position équatoriale, le prisme de verre tend à y revenir, tant du moins que l'électro-aimant est aimanté. Quand, dans ses oscillations entre les deux pôles, il s'approche du bord de l'une ou l'autre des deux surfaces polaires, on le voit s'arrêter et être vivement repoussé par ce bord.

Si les branches de l'électro-aimant sont trop écartées pour que l'action des pôles puisse se faire suffisamment sentir sur la substance suspendue entre eux, on place sur chaque surface polaire des pièces de fer doux, soit prismatiques, soit taillées en pointes vers les deux parties qui se regardent; et, avant d'aimanter l'électro-aimant, on met ces pièces ou armatures à une distance l'une de l'autre telle que le corps suspendu entre elles en soit aussi rapproché que possible, sans cependant être gêné dans ses mouvements de rotation autour de son fil de suspension. L'action directrice que nous avons décrite et désignée sous le nom d'équatoriale, se manifeste alors de la manière la plus prononcée. Mais ce n'est pas seulement le verre pesant qui lui obéit; toutes les substances organiques ou non organiques lui sont également soumises, à moins que, n'étant magnétiques ou ne renfermant une certaine proportion d'éléments magnétiques, elles ne prennent la direction *axiale*. Ainsi le *cristal de roche*, une foule de sels non métalliques et de composés chimiques, l'*iode*, le *phosphore*, le *soufre*, la *résine*, de la *viande cuite ou fraîche*, du *sang*, une *plume*, un *morceau de pomme* ou de *poire* prennent la direction équatoriale entre les pôles de l'électro-aimant.

M. Faraday a obtenu les mêmes effets en employant un fort aimant ordinaire en fer à cheval au lieu d'un électro-aimant; mais les phénomènes sont moins prononcés. Il faut avoir soin de ne faire usage, pour attacher au fil de suspension les corps soumis à l'influence du magnétisme, que de fils de cuivre ou de laiton nullement magnétiques.

Quand on examine de près le phénomène, en l'étudiant sur une substance telle que le verre pesant, qui le manifeste à un haut degré, on est frappé de voir la répulsion qu'exercent également sur la substance les deux pôles magnétiques. Ainsi, si le prisme de verre pesant est suspendu de façon que son centre de suspension, quoique situé sur la ligne axiale, soit plus rapproché de l'un des pôles que de l'autre, l'action de l'électro-aimant lui fait bien toujours prendre la position équatoriale; mais en même temps il est repoussé parallèlement à lui-même par le pôle dont il est le plus rapproché.

On voit cette répulsion se manifester à son plus haut degré, quand, dans son mouvement oscillatoire entre les pôles, le prisme se rapproche du bord de l'une ou l'autre des deux surfaces polaires. Du reste, quelle que soit la forme du morceau de verre pesant, aussi bien quand il est cubique ou sphérique que quand il est prismatique, il est repoussé par chacun des pôles également; mais, pour qu'il puisse éprouver une action directrice qui lui imprime la position équatoriale, il faut que la longueur l'emporte chez lui sur les autres dimensions. La répulsion semblerait donc être le phénomène dans sa plus grande simplicité, et la direction équatoriale serait le résultat de la tendance de chacune des particules du corps à se porter au lieu où la répulsion est la moindre et où, par conséquent, l'action magnétique est la plus faible.

§ 2. Distinction des corps en magnétiques et diamagnétiques.

Après avoir reconnu que tous les corps sont influencés par l'aimant, et par conséquent *magnétiques*, avec cette différence que les uns sont attirés et se placent *axialement*, tandis que les autres sont repoussés et se placent *équatorialement*, M. Faraday a appelé les premiers *paramagnétiques*, et les seconds *diamagnétiques*. Il s'est ensuite occupé à soumettre toutes les différentes substances à l'expérience, afin de déterminer à laquelle des deux catégories chacune d'elles appartient, et quel rang elle doit y occuper. Il a trouvé que les diamagnétiques sont essentiellement le *bismuth*, l'*antimoine*, le *zinc*, l'*étain*, le *cadmium*, le *mercure*, l'*argent* et le *cuivre*. La force avec laquelle l'action de l'aimant s'exerce varie avec ces divers métaux; le bismuth et l'antimoine l'éprouvent à un haut degré; un petit barreau de bismuth de 1 centimètre de largeur, est, de toutes les substances soumises à l'expérience, celle qui met le mieux en évidence le phénomène dans ses divers détails. Du reste, dans l'énumération que nous venons d'en faire, les métaux ont été classés dans l'ordre du degré d'intensité avec lequel ils manifestent le genre d'action dont il s'agit.

M. Faraday s'est servi du bismuth pour étudier quelques

particularités du phénomène, qui auraient échappé à l'observation avec des substances moins sensibles. C'est ainsi qu'il a constaté que deux barreaux de bismuth, délicatement suspendus et soumis en même temps à l'action des aimants, n'agissent point l'un sur l'autre, ce qui semble éloigner toute idée d'un antagonisme polaire dans les barreaux. M. Matteucci a fait la même observation en suspendant les deux barreaux dans le vide. Faraday a encore vu que de la poudre fine de bismuth, projetée sur du papier placé sur l'un des pôles de l'électro-aimant, affecte une disposition régulière; les particules se portent en dehors et en dedans d'une ligne circulaire, qui est justement le bord du cylindre de fer doux. Cette ligne reste parfaitement nette, ce qui montre la tendance des particules du bismuth à être repoussées à la fois dans toutes les directions; résultat d'accord avec la remarque que nous avons faite sur la répulsion plus vive exercée par les bords de la surface polaire sur les barreaux suspendus. M. Pouillet a obtenu des résultats semblables, en mélangeant du sesquichlorure de chrôme, qui est magnétique, avec du bismuth, tous les deux très-finement pulvérisés: il a vu un cercle violet, formé par le chlorure au-dessus de l'arête du pôle de l'électro-aimant qui l'attire, entre deux cercles bien distincts formés par la poudre de bismuth, qui est repoussée elle-même par l'arête.

Quelques-uns des métaux, et notamment le cuivre, éprouvent un mouvement d'un genre tout particulier à l'instant où, suspendus entre les pôles de l'électro-aimant, on aimante celui-ci. Ce mouvement, très-distinct de celui auquel obéit le barreau pour se placer dans la direction équatoriale, et qui a lieu lors même qu'il est déjà naturellement dans cette direction, se manifeste également au moment où cesse l'aimantation de l'électro-aimant. Il est dû évidemment au développement sur la surface du métal de courants induits par l'électro-aimant, ainsi que nous l'avons déjà indiqué plus haut. C'est au reste ce dont Faraday s'est assuré en variant la forme, les dimensions et la position primitive du métal qu'il soumet à l'expérience. D'ailleurs on n'observe nullement ces mouvements dans le verre pesant, ils sont à peine sensibles dans le bismuth,

et sont d'autant moins prononcés que le métal est moins conducteur de l'électricité. Voici l'ordre dans lequel Faraday, à la suite d'une étude détaillée qu'il a faite de ce mouvement *révulsif* (c'est ainsi qu'il l'a nommé), est arrivé à placer les différents métaux quant à l'énergie avec laquelle ils le manifestent dans les mêmes circonstances : *cuivre*, *argent*, *or*, *zinc*, *cadmium*, *étain*, *platine*, *palladium*, *plomb*, *antimoine* et *bismuth*. Cet ordre est le même que celui que M. Arago et MM. Herschell et Babbage avaient assigné aux métaux quant à leur faculté d'entraîner l'aiguille aimantée dans les phénomènes du magnétisme par rotation, et par conséquent de donner naissance sur leur surface à des courants d'induction; preuve que c'est bien à ce dernier genre d'action, qu'il ne faut pas confondre avec celui qui nous occupe, que sont dus les mouvements particuliers observés par Faraday.

En poursuivant ses recherches, M. Faraday est arrivé à trouver qu'indépendamment du fer, du nickel et du cobalt, il existe un grand nombre de substances qui se placent axialement entre les deux pôles d'un électro-aimant, et qui doivent donc être classées dans les corps paramagnétiques, comme les appelle Faraday, ou magnétiques, comme nous continuerons à les appeler. Il a remarqué en outre que la plupart des composés, et entre autres les sels des métaux magnétiques, le sont également, et c'est même du magnétisme de leurs composés qu'il en a conclu pour plusieurs, tels que le manganèse, le cérium, le chrôme, etc., leur propre magnétisme à eux. Ces composés sont magnétiques aussi bien quand ils sont dissous dans l'eau qu'à l'état solide. Les nombreux composés dans lesquels entre le fer ont été l'objet d'une étude particulière, et tous ils se sont placés axialement entre les pôles de l'électro-aimant, et ont été attirés par ces pôles. La présence d'une très-petite quantité de fer suffit pour rendre une substance magnétique. Ainsi, le verre vert de bouteille, le crown-glass sont magnétiques; le papier et le carton fin le sont également, probablement parce qu'ils ont été en contact avec du fer dans l'acte de la fabrication, car les substances organiques sont en général diamagnétiques. Cependant les cristaux jaunes

de ferro-cyanure de potassium aussi bien que les rouges prennent la direction équatoriale, ce qui semble indiquer qu'ils ne sont pas magnétiques. Cette anomalie tient probablement à l'état cristallin de la substance, qui, comme nous le verrons plus loin, influe sur la forme qu'affecte ce genre d'action.

L'influence si prononcée qu'exerce la présence d'une minime quantité de fer montre avec quelle précaution il faut opérer pour conclure, de ce qu'une substance prend la direction axiale, qu'elle est magnétique. Il suffit, par exemple, d'avoir coupé un morceau de bois avec un couteau pour qu'il se place axialement, tandis que le bois affecte toujours la direction équatoriale, étant éminemment diamagnétique. Aussi, quand on soumet des solutions, et en général des liquides, à l'expérience, on a soin de les mettre dans des tubes de verre à parois aussi minces que possible, et de choisir du verre blanc et par conséquent non magnétique. Il est vrai que le tube est alors diamagnétique; mais comme cette propriété n'est jamais aussi prononcée que l'autre, le diamagnétisme du verre n'empêche pas le magnétisme du liquide intérieur de se manifester.

On peut, du reste, éprouver les liquides, non-seulement en les plaçant dans des tubes, soit petits vases cylindriques de verre, suspendus horizontalement, mais aussi en étudiant les modifications qu'ils exercent sur les propriétés magnétiques ou diamagnétiques des corps qu'on y plonge. En voici un exemple: en mélangeant en proportion convenable du proto-sulfate de fer, qui est magnétique, et de l'eau, qui est diamagnétique, on peut se procurer une dissolution qui n'est ni repoussée ni dirigée par l'électro-aimant, du moins dans l'air, mais qui, entourée d'eau, prend la direction axiale; on peut même, en affaiblissant la proportion du fer, lui imprimer dans l'air une direction équatoriale, tandis qu'elle garde dans l'eau une direction axiale. Cette expérience nous montre qu'il est possible, par un mélange convenable de deux corps pris chacun dans l'une des classes, de se procurer une substance qui soit intermédiaire entre eux quant aux propriétés magnétiques et diamagnétiques, si du moins le milieu ambiant ne change pas, si c'est toujours l'air, par exemple. D'un autre côté, M. Faraday

n'a pu trouver aucun corps solide ou liquide, sauf les mélanges artificiels dont nous venons de parler, qui soit neutre, c'est-à-dire qui ne soit pas magnétique ou diamagnétique.

Un animal vivant, tel qu'une grenouille librement suspendue au-dessus de l'électro-aimant, prend la position équatoriale, ainsi que je l'ai observé moi-même. Il est assez étonnant que le sang qui contient un peu de fer soit diamagnétique, tandis qu'en général tous les composés du fer sont magnétiques. Cela tient probablement à la prédominance des parties constituantes du sang qui sont diamagnétiques. Par contre, bien des substances sont magnétiques sans qu'on eût pu le prévoir, telles que le papier, la cire à cacheter, le vermillon, le minium, l'albeste, le peroxyde de plomb, etc.

Après avoir découvert et analysé avec tant de soin les phénomènes du diamagnétisme, Faraday se contente d'énoncer la loi que lui a fournie l'expérience, savoir que les substances diamagnétiques sont celles qui, dans le champ des forces magnétiques, se dirigent des places où ces forces ont le plus d'intensité vers celles où elles en ont le moins, tandis que c'est l'inverse pour les magnétiques. Faraday entend par champ des forces magnétiques l'espace plus ou moins grand dans lequel les pôles d'un électro-aimant font sentir leur influence, et qui est traversé dans tous les sens par des forces d'intensités et de directions variables, dont les courbes tracées par la limaille de fer donnent, jusqu'à certain point, une idée assez exacte.

Les expériences de M. Faraday, que nous venons d'exposer, étaient à peine connues que MM. Becquerel père et fils cherchaient à montrer qu'elles rentraient dans celles que M. Becquerel père avait faites en 1827 sur le magnétisme transversal des corps, et dont nous avons parlé plus haut. Ils attribuaient la direction longitudinale, transversale ou oblique, que prend une substance entre les pôles d'un fort aimant, à la forme de la substance, qui, combinée avec son degré de magnétisme, détermine la résultante des forces magnétiques, et par conséquent la position qui en est la conséquence. MM. Becquerel appuyaient leur opinion principalement sur les expériences faites avec le

peroxyde de fer qui est magnétique, et qui cependant se conduit souvent comme un corps diamagnétique, expériences dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent.

M. Faraday a bien reconnu que cette substance prend en effet des positions très-variées entre les pôles des aimants, mais elle n'en est pas moins toujours attirée par l'aimant, comme tous les corps magnétiques. De plus, quand un tube plein de peroxyde de fer prend une direction transversale à la ligne des pôles, c'est une position d'équilibre instable, et pour peu qu'on l'en éloigne, il est attiré par les pôles. Avec les corps diamagnétiques, tels que le bismuth, le phosphore, etc., la position transversale est celle d'un équilibre stable; si la substance l'abandonne, elle y revient par une suite d'oscillations; et le centre de gravité de la masse est constamment *repoussé* et non *attiré* par l'aimant. Le fait simple et fondamental qui distingue les corps diamagnétiques des corps magnétiques, c'est que les premiers sont repoussés, tandis que les seconds sont attirés par l'aimant. La direction est un phénomène qui est une conséquence du fait fondamental, mais qui peut être modifié par différentes circonstances; la distribution du magnétisme ne se fait donc pas dans un sens transversal. Il arrive seulement quelquefois, comme avec une cartouche de peroxyde de fer, que l'état de désagrégation de la masse qui s'oppose à la transmission du magnétisme par induction de particule à particule, joint à la longueur absolue de la cartouche, détermine la création, à différentes distances et dans différentes directions, de pôles magnétiques qui peuvent être considérés comme indépendants les uns des autres. Il est facile de comprendre alors pourquoi la cartouche placée transversalement à la ligne des pôles de l'aimant y reste par l'effet de tous les pôles magnétiques de noms contraires qui se trouvent sur chacune de ses faces, et pourquoi lorsqu'une de ses extrémités s'approche excessivement de l'aimant, elle est attirée par lui et dérangée par conséquent de sa position équatoriale. En preuve que c'est bien la distribution particulière des pôles magnétiques résultante de l'état de désagrégation de la substance, et non, comme le croyaient MM. Becquerel, son faible degré de magnétisme qui détermine la direction que prend une

cartouche de peroxyde de fer, Faraday cite le fait que des substances bien moins fortement magnétiques que le peroxyde, mais qui ne présentent pas le même état de désagrégation, telles que les dissolutions très-étendues de proto-sulfate de fer, des solutions de sels de nickel et de platine, se conduisent exactement, à l'intensité près, comme tous les autres corps magnétiques et non comme le peroxyde.

M. Edmond Becquerel a repris plus tard la même question, et en opérant avec un énorme électro-aimant sur toutes les substances taillées en petits barreaux, il a cru pouvoir, tout en renonçant à l'idée d'un magnétisme transversal, persister dans son opinion, savoir, que tous les corps s'aimantent sous l'influence d'un aimant comme le fer doux lui-même, mais à un degré plus ou moins marqué, suivant leur nature. La direction qu'ils prennent dépendrait alors seulement de la différence qui existe entre l'action qui est exercée sur eux, et celle qui est exercée sur le milieu dont ils sont environnés. Une substance serait attirée par un centre magnétique avec la différence des actions exercées sur cette substance et sur le volume du milieu déplacé; d'où il suit qu'un corps est attiré par un centre magnétique ou en est repoussé suivant qu'il est plongé dans un milieu plus magnétique ou moins magnétique que lui, de même qu'un ballon tombe à la surface de la terre ou s'élève dans l'atmosphère suivant que le gaz dont il est rempli est plus dense ou moins dense que l'air. Ce principe serait analogue à celui d'Archimède pour la pesanteur, avec la différence que celui-ci s'applique à la masse du corps, tandis que l'intensité magnétique développée par influence dans une substance n'en dépend pas, mais est liée probablement avec la manière dont se trouve réparti dans le corps, le milieu subtil, soit l'éther, dont une certaine modification produit le magnétisme.

Il résulterait de cette manière de voir qu'il n'est pas nécessaire d'admettre de distinction entre le diamagnétisme et le magnétisme proprement dit, que tous les corps obéissent à l'action du magnétisme, mais à des degrés différents, et que les répulsions qu'exercent les deux pôles des aimants sur certaines substances sont uniquement dues à ce que ces substances sont

plongées dans un milieu plus magnétique qu'elles, milieu qui par sa nature donne lieu aux effets observés. L'expérience semble indiquer en effet que ces deux formes de l'action magnétique (le diamagnétisme et le magnétisme) suivent les mêmes lois et varient de la même manière proportionnellement au carré de l'intensité magnétique. M. E. Becquerel a fait usage pour obtenir ces résultats de la balance de torsion, ayant soin de ramener toujours les substances à la même position par rapport aux pôles de l'électro-aimant, et mesurant seulement dans chaque cas les angles de torsion. Il a obtenu par cette méthode les mêmes nombres proportionnels pour les mêmes substances, en faisant varier l'intensité de l'action magnétique. Il a également constaté de la même manière l'influence des milieux ambiants : ainsi le verre ordinaire, qui dans l'air est attiré par les pôles d'un aimant, est fortement repoussé par ces mêmes pôles dans les dissolutions de fer et de nickel; le soufre, la cire blanche, qui sont repoussés par les pôles magnétiques dans l'air, sont au contraire attirés quand ils se trouvent plongés dans des dissolutions concentrées de chlorure de calcium ou de chlorure de magnésium.

D'après cette théorie, il semblerait que tous les corps devraient être attirés par les aimants dans le vide, puisque l'attraction est le fait général, qui n'est modifié que par la présence du milieu ambiant; or plusieurs substances, telles que le bismuth, le phosphore, le soufre, sont au contraire autant repoussées dans le vide que dans l'air. Pour expliquer cette anomalie, qu'il a lui-même constatée, M. Becquerel est obligé d'admettre qu'une enceinte vide se comporte comme un milieu plus magnétique que la substance qui est repoussée; en d'autres termes, que le vide, ou plutôt le milieu éthéré à l'aide duquel se transmettent les actions magnétiques, est magnétique lui-même, et qu'il l'est plus que certains corps et moins que d'autres; mais cette conséquence nous paraît contraire à toutes les notions reçues sur le magnétisme, propriété essentiellement liée à la matière et qui semble en être inséparable.

M. Plucker, tout en se rapprochant, quant aux lois qui régissent les phénomènes, de celles de M. E. Becquerel, n'en tire

point la même conséquence relativement au magnétisme du vide. Il arrive bien comme lui à des lois qui ne sont autre chose que le principe d'Archimède étendu, et dans lequel la force du magnétisme remplace la pesanteur; mais il l'applique au diamagnétisme comme au magnétisme, ne faisant pas rentrer l'un dans l'autre. Si un aimant agit par attraction ou par répulsion sur les molécules d'un corps ou d'un fluide qui l'environne, l'effet de l'aimant sur le corps plongé est le même que sur le corps dans le vide, moins l'effet produit sur le volume du liquide dont le corps tient la place. Ces lois expliquent pourquoi un aréomètre, qui est fort peu affecté par l'aimant, s'élève dans un liquide magnétique et descend dans un liquide diamagnétique, quand il est placé au-dessus des pôles, et présente des effets contraires quand il est placé au-dessous. Elles montrent aussi pourquoi un solide magnétique plongé dans un liquide plus magnétique que lui se comporte diamagnétiquement, tandis qu'un corps diamagnétique se montre magnétique dans un liquide plus diamagnétique que lui. Ainsi s'explique la force extraordinaire avec laquelle le bismuth et le verre, qui est un peu magnétique, se dirigent équatorialement dans une solution saturée de sulfate de fer, malgré la résistance du mileu.

On voit donc que M. Plucker admet comme M. Faraday, et contrairement à M. E. Becquerel, que le magnétisme et le diamagnétisme des corps sont deux propriétés distinctes et opposées, mais il estime qu'elles ont une origine semblable, et il est disposé à adopter à cet égard les idées de Poggendorff, de Reich et de Weber, qui considèrent les phénomènes diamagnétiques comme provenant, de même que les magnétiques, d'une polarité induite par l'action de l'aimant dans les substances soumises à son influence, avec cette différence, cependant, que les pôles sont dans les diamagnétiques de même nature que les pôles les plus rapprochés de l'aimant, contrairement à ce qui a lieu dans les magnétiques, où ils sont de nature contraire. Ainsi de même que le pôle de l'aimant fait naître à l'extrémité d'un barreau de fer un pôle attractif, il en détermine un répulsif à l'extrémité d'un barreau de bismuth; ou, ce qui revient au

même, les courants qu'Ampère suppose excités par l'influence de l'aimant dans le fer y ont une direction opposée à celle qu'ils prennent dans le bismuth.

Poggendorff avait trouvé que si l'on approche d'un barreau de bismuth, d'antimoine ou de phosphore, disposé équatorialement entre les pôles d'un électro-aimant, l'extrémité d'une petite aiguille aimantée trop faible pour induire elle-même un magnétisme sensible, cette extrémité attire le barreau du même côté où elle l'aurait repoussé s'il eût été de fer; preuve que l'électro-aimant détermine dans les substances diamagnétiques des pôles de même nom que ceux qui agissent sur elles. Le même physicien avait encore observé que si l'on entoure d'une hélice, parcourue par un courant électrique, un barreau de bismuth suspendu équatorialement entre les pôles d'un électro-aimant, ce barreau se meut dans l'intérieur de l'hélice, dans un sens qui semble indiquer qu'il a acquis une polarité semblable, pour chacune de ses parties, à celle du pôle magnétique le plus rapproché. M. Reich avait remarqué, de son côté, que lorsqu'on fait agir simultanément sur la même face d'un barreau de bismuth les deux pôles opposés de deux aimants, la répulsion engendrée est égale à la différence et non à la somme des forces que possède chaque pôle agissant seul, de telle façon que, si l'on se sert des deux pôles d'un électro-aimant parfaitement égaux, l'effet est tout à fait nul, il n'y a ni attraction ni répulsion.

Ces expériences et d'autres du même genre, quoiqu'en apparence favorables à l'idée de la polarité diamagnétique, sont loin d'être concluantes; c'est ce qui résulte de l'examen qu'en ont fait et M. Faraday, qui lui-même avait, dans l'origine, penché vers cette opinion, et le professeur Thomson de Glascow. Ces deux physiciens estiment que ces effets proviennent d'une modification qu'apporte dans le champ des forces magnétiques l'introduction d'un aimant nouveau ou d'une hélice électro-dynamique, destinés à démontrer la polarité de la substance qui est dans ce champ. Ainsi, par exemple, M. Plucker, pour appuyer l'idée de la polarité, avait cité le fait que, si l'on place équatorialement un cylindre de fer doux entre les pôles

d'un électro-aimant, un peu au-dessous du plan dans lequel se meut un cylindre semblable de bismuth, la force avec laquelle ce dernier vient se placer équatorialement est beaucoup augmentée, d'où il avait conclu que les deux extrémités du bismuth ont acquis, sous la même influence de l'électro-aimant, des pôles contraires à ceux qu'ont acquis les deux extrémités du fer. M. Faraday a montré que ce résultat provient uniquement de l'altération que la présence du barreau de fer a apportée aux lignes de force magnétique. En effet, cette présence doit accroître la force qui règne entre les deux pôles de l'électro-aimant sur la ligne qui les joint, et diminuer l'intensité de celle qui existe sur la ligne équatoriale, le fer qui est au-dessous la neutralisant en partie, de sorte que le bismuth est chassé de la position axiale à la position équatoriale avec une différence de force beaucoup plus grande que lorsqu'il n'y a plus de fer doux.

M. Thomson, de son côté, a réussi en modifiant par des positions diverses données aux aimants la direction et l'intensité des forces dans le champ magnétique, à imprimer à des corps magnétiques, tels qu'une balle de fer doux, des mouvements analogues à ceux qu'éprouvent dans les mêmes circonstances des corps diamagnétiques. Ainsi, une balle de fer doux d'un très-petit volume, et très-délicatement suspendue à un long levier horizontal, peut, sous l'influence des deux pôles contraires et de force inégale placés du même côté par rapport à elle, mais à des distances différentes, être tenue en équilibre à une certaine distance de l'un et de l'autre. Ainsi encore, la même balle, quand elle est soumise à l'action de deux pôles égaux en force mais de même nom, aura non-seulement une position d'équilibre instable au milieu de la ligne qui joint ces pôles, mais aussi deux positions d'équilibre stable aux deux extrémités d'une ligne droite tirée perpendiculairement au milieu de la première et d'une longueur qui dépend de la force des pôles magnétiques. Tous ces effets, et d'autres encore du même genre, peuvent être obtenus d'une manière moins prononcée, il est vrai, mais cependant sensible, en remplaçant la balle de fer doux par des corps très-peu magnétiques et même

par des corps diamagnétiques. En preuve de l'identité de l'action exercée sur ces dernières substances et sur les magnétiques, M. Thomson cite le fait que, suivant lui, pour les unes comme pour les autres, l'effet exercé par l'aimant est proportionnel à sa force; résultat opposé à ceux par lesquels M. Plucker avait cru pouvoir établir que le diamagnétisme décroît plus rapidement que le magnétisme avec la diminution de la force de l'électro-aimant ou avec l'augmentation de la distance. Ce physicien avait, en effet, trouvé que si l'on met sur un verre de montre, qui est légèrement magnétique, un peu de mercure ou de bismuth, à une certaine distance des pôles, le diamagnétisme l'emporte, et il y a répulsion; à une distance plus grande, c'est le magnétisme qui l'emporte, et il y a attraction. M. Thomson estime que les changements d'effets qui sont dus à l'augmentation de la distance proviennent de l'influence du second pôle de l'électro-aimant, laquelle devenant plus sensible à mesure qu'on s'éloigne du pôle qui agit directement sur les substances soumises à l'expérience, apporte une modification dans la distribution des lignes de force magnétique. Il s'est également assuré que cette distribution est altérée d'une manière très-prononcée par un changement dans l'intensité de la force absolue de l'électro-aimant; ce qui expliquerait également pourquoi des substances telles que le charbon, dont le magnétisme et le diamagnétisme sont l'un et l'autre peu prononcés, se placent, comme l'a encore observé M. Plucker, tantôt axialement, tantôt équatorialement, suivant que cette force est plus ou moins considérable. On voit donc qu'une observation attentive des phénomènes n'est point favorable à l'idée d'une polarité dans les corps diamagnétiques; toutefois on a argué en faveur de cette opinion une autre classe de faits découverts par Weber, qui méritent un sérieux examen.

C'est en remplaçant, dans une bobine destinée à opérer l'induction, le fer doux par un métal diamagnétique, que Weber a cru trouver la preuve de l'acquisition par ce métal, sous l'influence d'un fort électro-aimant, de pôles de nature contraire à ceux qu'acquiert le fer dans les mêmes circonstances.

La bobine est entourée d'un fil de cuivre recouvert de soie de 300 mètres de longueur et de $\frac{3}{5}$ de millimètre de diamètre, dont les deux extrémités communiquent avec celles d'un galvanomètre très-sensible, et elle est placée verticalement sur la surface polaire d'un électro-aimant. On introduit successivement dans la bobine des cylindres faits de différents métaux, et un commutateur placé dans le circuit dont fait partie le galvanomètre est combiné de façon à pouvoir fermer ce circuit, ou au moment de l'entrée, ou au moment de la sortie du cylindre métallique. Le galvanomètre accuse chaque fois la présence d'un courant instantané, et comme on a soin de maintenir au même degré de force le magnétisme de l'électro-aimant, le courant observé ne peut être qu'un courant d'induction provenant de l'introduction dans la bobine d'un métal sur lequel agit un pôle magnétique. Mais ce courant, quand il est produit par un barreau de bismuth, par exemple, a un sens contraire à celui qu'il possède quand c'est un barreau de fer doux qui lui donne naissance, d'où M. Weber conclut que le barreau de bismuth prend à ses deux extrémités des pôles de nature contraire à ceux que prend sous la même influence le barreau de fer doux.

En répétant les expériences de Weber en février 1850, j'avais obtenu des résultats analogues aux siens, mais seulement je n'avais pas trouvé que l'intensité de l'effet obtenu fût en rapport avec le degré de diamagnétisme de la substance : ainsi l'introduction d'un cylindre en zinc dans la bobine donnait un courant plus fort que celui qui était dû à l'introduction du cylindre de bismuth, quoique le zinc soit bien moins diamagnétique que le bismuth; et l'antimoine et le plomb, l'un très-diamagnétique, l'autre très-peu, ne donnèrent l'un et l'autre qu'un courant presque imperceptible. Après une étude longue et détaillée de ces phénomènes, Faraday est arrivé en effet à reconnaître qu'ils ne sont point dus au diamagnétisme, mais à la conductibilité plus ou moins considérable des métaux, sur la surface desquels il s'établit, quand on les introduit dans la bobine, des courants d'induction analogues à ceux que Dove a observés, et dont nous avons parlé dans le chapitre précédent.

L'appareil de Faraday consiste dans une hélice de trois pou-

ces de longueur et de deux pouces de diamètre intérieur, fixée horizontalement à l'extrémité d'un cylindre de fer doux qui y pénètre d'un pouce; ce cylindre de fer doux est lui-même l'extrémité de l'une des branches d'un fort électro-aimant. Un système de suspension construit avec beaucoup de soin permet d'imprimer un mouvement de va-et-vient de deux pouces de course, dans un sens horizontal, à un levier de bois de deux pieds de longueur, à l'une des extrémités duquel on fixe successivement des cylindres de différents métaux de 5 ½ pouces de longueur et de 3/4 de diamètre; l'appareil est disposé de façon que ces cylindres puissent pénétrer dans l'hélice et en sortir jusqu'à six fois dans une seconde, sans faire éprouver le moindre ébranlement ni à l'hélice, ni à l'électro-aimant, ce qui est essentiel. Les deux bouts de l'hélice communiquent avec ceux d'un galvanomètre, et un commutateur, dont le mouvement est lié à celui du levier qui porte le cylindre de métal, permet de ne percevoir qu'un des courants, celui qui se développe au moment de l'introduction ou celui qui a lieu au moment de la sortie d'un des cylindres. Voici maintenant les résultats.

Les cylindres faits de métaux très-magnétiques, tels que fer et nickel, déterminent un très-fort courant induit dont le sens indique qu'il est dû à la polarité qui est acquise par ces métaux au moment où ils s'approchent de l'électro-aimant, et qui disparaît au moment où ils s'en éloignent; toutefois ce mode d'accuser l'existence de la polarité magnétique n'est pas très-sensible, car des substances fortement magnétiques, telles qu'une solution de prosulfate de fer ou un cristal de sulfate de fer, ne produisent aucun effet. Il n'en est plus de même quand on fait usage de métaux diamagnétiques. On obtient une déviation en sens contraire de celle que produit l'emploi des métaux magnétiques; mais l'intensité de cette déviation n'est point proportionnelle à celle du diamagnétisme. Ainsi elle est considérable avec des cylindres d'or, d'argent et de cuivre, car elle se maintient d'une manière permanente jusqu'à 66 ou 70°, tandis qu'elle est très-peu sensible avec le platine et le plomb, et nulle avec l'antimoine. L'énergie de l'effet paraît donc dé-

pendre exclusivement du degré de conductibilité de la substance, et par conséquent de la facilité avec laquelle les courants d'induction peuvent s'établir sur sa surface. Voici encore quelques preuves à l'appui de cette manière d'expliquer la production des courants que détermine dans le fil de l'hélice l'introduction d'un métal diamagnétique.

On peut, sans diminuer l'intensité de l'effet, diminuer la longueur du cylindre diamagnétique et le réduire même d'un pouce, ce qui tient à ce que les courants d'induction qui circulent autour de sa surface ne sont développés que dans la partie la plus rapprochée du pôle de l'électro-aimant, tandis qu'une semblable diminution de longueur opérée sur le cylindre magnétique entraîne un grand affaiblissement du courant, qui dans ce cas est dû à la polarité qu'acquiert le métal sous l'influence de l'aimant, et dont l'effet n'a toute sa puissance qu'autant que le cylindre est aussi long que l'hélice.

La division du cylindre métallique en fils de même longueur, mais d'un très-petit diamètre, a un effet tout opposé; elle augmente notablement la puissance des métaux magnétiques, elle annule entièrement celle des métaux diamagnétiques : ce double effet contraire tient à la même cause, savoir, à l'obstacle que la division apporte à l'établissement des courants d'induction autour de la surface du métal, cause unique des courants accusés par le galvanomètre dans le cas des métaux diamagnétiques, cause au contraire d'affaiblissement de ces courants dans le cas des métaux magnétiques. Cette observation avait déjà été faite par Dove, comme nous l'avons remarqué dans le chapitre V, p. 425. Si l'on substitue à un faisceau de fils de cuivre, d'or ou d'argent, dont l'effet est nul, un cylindre de même diamètre, mais formé par la superposition de disques de ces mêmes métaux, on obtient un courant de 25 à 30°, parce que les courants d'induction peuvent s'établir autour du contour des disques.

A ces preuves très-concluantes, Faraday en ajoute encore d'autres tirées du fait que la vitesse avec laquelle on introduit le cylindre métallique dans l'hélice exerce une influence très-différente sur l'intensité des courants induits, selon que le mé-

tal est magnétique ou diamagnétique, et de ce que le commutateur doit agir dans l'un des cas à un moment très-différent de celui auquel il doit agir dans l'autre, pour donner le maximum d'effet.

Les conclusions auxquelles arrive Faraday ont été encore confirmées par les recherches de M. Verdet. Ce physicien s'est servi dans ses expériences d'un aimant en fer à cheval devant les pôles duquel tourne une plaque métallique; les branches de l'aimant sont placées dans l'axe de deux bobines à long fil qu'on fait communiquer avec un galvanomètre sensible. En opérant avec des substances légèrement magnétiques, telles que du sulfure de fer, on obtient des courants induits très-appréciables, ce qui montre la sensibilité de l'appareil; quant aux métaux non magnétiques, l'intensité des courants induits pendant la période du mouvement où la plaque est très-voisine de la ligne des pôles montre que les effets ne dépendent que de la conductibilité des métaux, et nullement de leur pouvoir diamagnétique. M. Verdet, pour analyser le phénomène dans ses détails, a ajouté à la machine un commutateur qui ne laisse arriver le courant au galvanomètre que pendant la deuxième partie d'une rotation de la plaque; il a aussi reconnu, comme M. Faraday, *l'influence du temps* sur l'induction, ce qui explique pourquoi les courants induits ne sont pas distribués d'une manière symétrique, pendant la période où la plaque s'éloigne de la ligne des pôles et pendant la période où elle s'en approche; dissymétrie d'autant plus marquée que la vitesse de rotation est plus grande.

L'idée d'une polarité diamagnétique analogue, mais de sens contraire à la polarité magnétique, nous paraît donc difficile à admettre. Il est vrai que Weber, Plucker et d'autres physiciens se sont efforcés de la confirmer par de nouvelles recherches, mais leurs expériences ne nous paraissent pas à l'abri de toute objection. Nous les examinerons à la fin de ce chapitre, dans le paragraphe que nous consacrerons à la théorie du diamagnétisme; mais auparavant il nous faut étudier plus en détail que nous ne l'avons fait cette nouvelle classe de phénomènes si curieux et si intéressants.

§ 3. Détermination de l'action de l'aimant sur les différents corps solides, liquides et gazeux.

M. Faraday, après avoir découvert que tous les corps subissent l'influence du magnétisme et qu'ils doivent être distingués, à cet égard, en corps magnétiques qui sont attirés, et corps diamagnétiques qui sont repoussés par l'aimant, s'était d'abord contenté de dresser une liste des substances magnétiques et diamagnétiques placées les unes à la suite des autres dans l'ordre de leur pouvoir, en commençant par la plus magnétique (*le fer*) et terminant par la plus diamagnétique (*le bismuth*). Voici cette liste :

Fer.	0° Air et vide.	Cadmium.
Nickel.	Arsenic.	Étain.
Cobalt.	Ether.	Zinc.
Manganèse.	Alcool.	Verre pesant.
Chrôme.	Or.	Antimoine.
Cerium.	Cuivre.	Phosphore.
Titane.	Argent.	Bismuth.
Palladium.	Plomb.	
Crown-glass.	Eau.	
Platine.	Mercure.	
Osmium.	Sodium.	
0° Air et vide.	Flint-glass.	

M. Plucker, M. E. Becquerel et M. Faraday lui-même ont plus tard cherché à évaluer numériquement les pouvoirs magnétiques et diamagnétiques des différentes substances solides, liquides et gazeuses, et les lois qui régissent ces pouvoirs. MM. Plucker et E. Brcquerel ont fait usage d'un puissant électro-aimant, mais le premier s'est servi, pour en mesurer les effets, d'une balance ordinaire très-sensible, le second de la torsion d'un fil d'argent de 45 millièmes de millimètre de diamètre.

M. Plucker avait cru pouvoir conclure de l'expérience du petit barreau de charbon qui se met dans la direction de la ligne des pôles de l'électro-aimant quand il en est très-rapproché, et qui se place à angle droit quand on l'élève au-dessus de ces pôles, que les actions diamagnétiques ne varient pas avec la distance dans les mêmes rapports que les actions magnéti-

ques. Une autre expérience que nous avons également déjà citée l'avait aussi conduit à la même conclusion; c'est celle dans laquelle en versant dans un verre de montre suspendu au bassin d'une balance au-dessus de l'un des pôles d'un électro-aimant une quantité de mercure suffisante pour que son diamagnétisme fasse équilibre au magnétisme du verre, on voit qu'à une certaine distance la répulsion l'emporte sur l'attraction, et qu'à une distance plus grande, c'est l'attraction. De même si la force de l'aimant diminue, le diamagnétisme décroît plus vite que le magnétisme; c'est ce qu'on peut vérifier en plaçant un morceau de bismuth sur le verre de montre, et en faisant passer dans le fil qui entoure l'électro-aimant un courant plus ou moins fort. Il avait donc déduit de là cette loi générale que le diamagnétisme décroît plus vite que le magnétisme, quand la force de l'aimant diminue ou quand la distance des pôles augmente. Plus tard il est arrivé à reconnaître que le pouvoir magnétique des corps varie également avec l'intensité de la puissance magnétique à l'action de laquelle ils sont soumis.

M. E. Becquerel avait obtenu, de son côté, des résultats contraires. En opérant d'abord avec un barreau de soufre long de 25 millimètres et pesant 840 milligrammes, puis avec un barreau de bismuth de même longueur, et pesant 1 gramme 933 milligrammes, il avait trouvé, en agissant dans les deux cas successivement, avec 20, 17, 14 et 10 couples, pour aimanter l'électro-aimant, que la répulsion varie comme le carré de l'intensité du courant qui aimante l'électro-aimant. Un galvanomètre à sinus, interposé dans le circuit, indiquait dans chaque cas la force du courant; l'expérience sur le bâton de soufre était faite dans l'air, et celle sur le barreau de bismuth dans l'eau. La même loi se présente dans l'action d'un aimant sur le fer doux, ainsi que cela résulte de la théorie et de l'expérience également. En effet, quand un aimant agit sur un corps non aimanté, il exerce d'abord une action inductrice qui doit développer dans ce corps une force mi, i étant l'intensité de l'aimant, et m un coefficient qui dépend de la nature de la substance; l'effet de l'aimant étant le produit de son intensité, et de l'intensité de la

force développée par influence dans le corps sur lequel il agit, doit donc être $i \times mi$ ou mi^2. Si l'aimant agit sur une aiguille aimantée au lieu d'agir sur un barreau de fer doux, comme il n'y a pas de force produite par induction, l'action est sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant, au lieu d'être proportionnelle au carré de l'intensité. M. E. Becquerel explique la différence qui existe entre ses résultats et ceux obtenus par M. Plucker, en les attribuant à ce que, lorsque la position des corps varie par rapport aux pôles de l'aimant à l'action duquel ils sont soumis, il en résulte des changements dans la direction de la résultante des forces qui agissent sur eux, changements qui doivent donner lieu à des effets complexes et difficiles à prévoir. Tout en admettant qu'il faille faire une part à cette cause d'erreur, nous ne croyons pas cependant que la loi de M. E. Becquerel soit aussi générale qu'il le croit, et nous sommes disposés à admettre avec M. Plucker que l'intensité absolue du magnétisme peut influer sur les phénomènes du diamagnétisme et du magnétisme d'une manière qui, au delà de certaines limites, n'est soumise à aucune loi régulière.

Voici maintenant comment M. Plucker est parvenu à déterminer le magnétisme et le diamagnétisme spécifique des différentes substances qu'il a soumises à l'expérience. Il place la substance dans un verre de montre recouvert d'un verre bien plan et dépoli qui s'applique exactement sur les bords du verre de montre; de cette manière il donne à chaque substance soumise à l'expérience un volume toujours semblable et de même forme. On place le tout sur un anneau mince de laiton suspendu par trois fils de soie longs de deux décimètres à une balance sensible au milligramme; puis, au moyen d'un courant d'une force constante, on aimante l'électro-aimant, dont l'un des pôles attire ou repousse la substance disposée toujours de la même manière par rapport à ce pôle.

Posant en principe que le magnétisme, ou le diamagnétisme propre de chaque substance, est proportionnel à sa masse, principe que M. Plucker a essayé de vérifier directement en mélangeant, en plus ou moins grande quantité, de la limaille fine de fer avec de la cire, de manière que le volume total fût

toujours le même, on obtient le magnétisme ou le diamagnétisme des corps, en divisant par leur poids la force également exprimée en poids avec laquelle un volume égal de chacun d'eux est attiré ou repoussé; on a ainsi l'élément cherché pour des poids égaux. Les substances solides sont réduites, dans ces expériences, en poudre aussi impalpable que possible.

On trouve, par cette méthode, qu'en exprimant par 100,000 l'intensité de magnétisme du fer, cette intensité est pour la pierre d'aimant de 40,227, pour le fer olégiste de 553, et pour le peroxyde brun de 71. De tous les composés solides ou liquides dans lesquels entre le fer, ce dernier est celui qui a donné le résultat le plus faible. Voici, du reste, le tableau détaillé des résultats sur lesquels nous nous bornerons à remarquer que la combinaison des acides avec les oxydes, pour former des sels, n'affaiblit pas le magnétisme originel des oxydes; que l'eau d'hydratation renforce quelquefois le magnétisme, comme c'est le cas avec l'hydrate de protoxyde de nickel, qui est trois fois plus magnétique que le protoxyde lui-même; qu'enfin tous les composés de manganèse soumis à l'expérience ont été trouvés magnétiques.

1. Fer.	100.000
2. Pierre d'aimant.	40.000
3. Oxyde de fer, nº 1.	500
4. » » nº 2.	286
5. Ocre rouge.	134
6. Fer olégiste.	533
7. Fer oxydé hydraté.	156
8. Fer oxydé brun.	71
9. Sanguine artificielle.	151
10. Sulfate d'oxyde de fer sec.	111
11. Vitriol de fer.	78
12. Solution saturée de nitrate d'oxyde de fer.	34
13. » » chlorhydrate.	98
14. » » sulfate.	58
15. » » chlorhydrate de potasse.	85
16. Vitriol de fer en dissolution.	126
17. Sulfate de protoxyde dissous dans le vitriol.	142
18. Nitrate d'oxyde en dissolution.	95
19. Chlorhydrate d'oxyde de fer.	224
20. Sulfate d'oxyde de fer.	133

21. Chlorhydrate de protoxyde de fer.	190
22. Sulfate de protoxyde de fer.	219
23. Deutochlorure de fer en solution.	254
24. Protochlorure.	216
25. Fer sulfuré.	150
26. Protoxyde de fer dans la solution chlorhydrique. . .	381
27. » » » » sulfurique. . . .	462
28. Peroxyde de fer dans l'hydrate.	206
29. » » la sanguine.	168
30. » » la solution nitrique.	287
31. » » » » chlorhydrique. . . .	516
32. » » » » sulfurique.	332
33. Fer dans la pierre d'aimant.	55.552
34. » » l'oxyde, n° 1.	714
35. » » » n° 2.	409
36. » » l'ocre rouge.	191
37. » » le fer digiste.	761
38. » » le fer oxydé hydraté.	296
39. » » la sanguine.	240
40. » » la pyrite.	321
41. » » le sulfate d'oxyde.	349
42. » » le vitriol de fer.	385
43. » » la solution de nitrate d'oxyde.	410
44. » » » chlorhydrate.	737
45. » » » sulfate.	474
46. » » » chlorhydrate de protoxyde. .	490
47. » » » de sulfate.	594
48. Protoxyde de nickel.	35
49. Hydrate de protoxyde de nickel.	106
50. Nitrate de protoxyde de nickel en dissolution. . . .	65
51. Sulfate.	100
52. Chlorure de nickel dans la dissolution précédente. . .	111
53. Protoxyde de nickel dans l'hydrate.	142
54. » » » la solution nitrique. . . .	164
55. » » » » hydrohydrique. .	171
56. Nickel dans l'oxydule.	45
57. » » l'hydrate de protoxyde.	180
58. » » la solution nitrique.	208
59. » » » hydrohydrique.	217
60. Hydrate d'oxyde manganique.	70
61. Oxyde manganeux.	167
62. Oxyde manganique dans l'hydrate.	78
63. Manganèse dans l'hydrate d'oxyde.	112
64. » » » d'oxydule.	322

Voici maintenant les résultats que M. Plucker a obtenus pour le diamagnétisme de diverses substances à poids égal.

Eau	100	1
Phosphore	100	
Sulfure de carbone	102	
Acide hydrochlorique	102	
Éther sulfurique	127	5/4
Essence de térébenthine	123	
Fleur de soufre	71	3/4
Sel de cuisine	79	
Acide nitrique	48	1/2
Nitrate de bismuth	35	1/3
Acide sulfurique	34	
Mercure	23	1/4

Il semble résulter de ces tableaux, ainsi que nous l'avons indiqué en groupant ensemble les substances dont le diamagnétisme spécifique est à peu près le même, que les rapports du diamagnétisme de ces différents groupes sont exprimés par des *rapports simples*. Cependant, cette loi aurait besoin, pour pouvoir être admise d'une manière générale, d'un plus grand nombre d'observations et d'un procédé plus délicat encore, pour apprécier les petites différences que présentent entre elles les diverses substances quant à leur diamagnétisme relatif, différences qui sont bien plus grandes en réalité.

M. Plucker a fait quelques recherches sur l'influence que la température exerce sur l'intensité du magnétisme des corps; mais les résultats auxquels il est parvenu ne sont encore ni assez nombreux, ni assez concordants pour qu'on puisse en déduire quelque loi générale. Ainsi il a trouvé qu'une masse de bismuth de 144 grammes exige, à la température ordinaire, un poids de 167 grammes pour contre-balancer l'effet de la répulsion diamagnétique, tandis qu'il ne faut plus que 28 grammes lorsque la température est voisine de celle du point de fusion de ce métal. D'un autre côté, le diamagnétisme du mercure ne varie pas sensiblement de 0° à 300, et celui du soufre et de la stéarine reste le même jusqu'au delà de leur point de fusion. L'état solide ou liquide est sans influence sur cette propriété;

la glace, d'après les observations de M. Brunner fils, est aussi diamagnétique que l'eau liquide ou en vapeur. L'influence de la combinaison chimique ne paraît pas non plus être soumise à des lois bien simples; ainsi le sel, qui résulte de la combinaison d'un acide diamagnétique avec un oxyde magnétique, a un magnétisme aussi fort que l'oxyde. La dissolution du sulfate de fer est plus magnétique que le sulfate lui-même dans le rapport de 78 à 126. On pourrait citer plusieurs autres exemples pour montrer l'impossibilité de découvrir, du moins actuellement, quelque loi dans cet ordre de phénomènes. Il est probable que ces anomalies tiennent à ce que les propriétés magnétiques et diamagnétiques des corps dépendent à la fois de leur nature chimique et de leur constitution moléculaire; cette seconde circonstance a une très-grande influence, ainsi que le démontre une classe particulière de faits, celle relative aux corps cristallisés dont nous nous occuperons plus tard dans un paragraphe spécial.

Un des points essentiels des recherches de M. Plucker est d'avoir démontré les variations qu'éprouvent les attractions ou les répulsions magnétiques avec l'intensité du courant. Voici un tableau qui renferme les résultats numériques qu'il a obtenus en aimantant successivement des électro-aimants avec des courants de deux intensités différentes.

	Courant d'un seul couple de grove ou d'intensité 1.	Courant d'une intensité 4 fois plus grande.
Fer	1.000.000	1.000.000
Cobalt	1.008.900	912.200
Nickel	465.700	350.900
Oxyde de fer	758	954
Oxyde de nickel	286	405
Hydrate d'oxyde de cobalt	2.178	5.015
Bismuth	23. 6	39.03
Phosphore	16.45	27.31

Au lieu de se servir de la balance ordinaire, et d'évaluer par des poids le magnétisme et le diamagnétisme spécifique des corps, M. E. Becquerel a fait usage, comme nous l'avons dit, d'une balance de torsion placée au-dessus des pôles d'un énorme

électro-aimant, sur lesquels elle repose. Pour amortir les oscillations continuelles de l'extrémité du fil de torsion, qui porte le barreau soumis à l'expérience, on suspend au milieu de ce barreau, au moyen d'un fil de cocon double, une petite balle en plomb qui plonge dans l'eau à un centimètre et demi de distance; on s'assure facilement que la présence de cette sphère n'apporte aucune perturbation aux observations qui se font avec beaucoup plus de précision. Un microscope fixé à l'un des côtés de la balance de torsion porte un micromètre au foyer de l'oculaire auquel on ramène par la torsion les barreaux successivement soumis à l'expérience, après avoir eu soin de tracer une croix à l'extrémité de chacun d'eux pour servir de point de repère. On mesure le nombre de degrés de torsion nécessaire pour ramener le point de croisement au centre du micromètre, et on obtient ainsi la mesure exacte de l'effet dû à l'action de l'aimant; pour se mettre à l'abri des causes d'erreur, on change le sens de l'aimantation dans l'électro-aimant, au moyen d'un commutateur, et on mesure de nouveau l'effet produit qui est presque toujours identique avec le premier observé. Enfin, on s'assure de la constance du courant employé au moyen d'un galvanomètre à sinus placé dans le circuit.

M. E. Becquerel s'est surtout proposé de déterminer la valeur des actions magnétiques dans différents milieux, en partant toujours du principe que tous les corps sont magnétiques à la manière du fer, et que l'effet attractif ou répulsif observé est dû à la différence qui existe entre le magnétisme spécifique d'un corps et celui du milieu dans lequel il se trouve placé. Mais quelle que soit la théorie qu'on adopte, les nombres qu'a obtenus M. Becquerel n'en demeurent pas moins des données importantes à enregistrer. Pour avoir un terme de comparaison fixe, il a rapporté toutes les déterminations au magnétisme spécifique de l'eau dans l'air qu'il a fait égal à — 10, l'eau étant repoussée par l'aimant dans l'air et dans le vide. Enfin, en mesurant l'action de l'aimant sur deux barreaux, l'un de soufre, l'autre de cire blanche, placés d'abord dans l'air, puis dans différents milieux, il en a déduit le magnétisme spécifique de ces différents milieux, ainsi que celui du soufre et de la cire à

volume égal; les résultats auxquels il est parvenu, en se servant du bâton de soufre, sont presque identiques pour chaque milieu à ceux que lui a fournis l'emploi du bâton de cire.

Voici deux tableaux qui renferment la détermination numérique de l'action de l'aimant sur différentes substances placées dans l'air à volume égal; ces nombres expriment donc, suivant M. Becquerel, l'action de l'aimant sur le corps placé dans le vide, moins l'action de l'aimant sur un volume égal d'air. Le signe — indique une répulsion et le signe + une attraction.

Eau	— 10
Zinc ordinaire	— 2.5
Cire blanche	— 5.68
Soufre sublimé, puis fondu	— 11.37
Plomb d'œuvre	— 15.28
Phosphore	— 16.39
Sélénium	— 16.52
Bismuth	— 217.6

Les valeurs relatives au zinc et à la cire blanche étant plus faibles que celles qui se rapportent à l'eau, ces deux substances doivent être attirées par l'aimant dans l'eau; elles le sont effectivement ainsi que dans presque tous les liquides.

Le tableau suivant, construit sur les mêmes bases que le précédent, contient les résultats relatifs aux liquides et aux dissolutions salines.

Eau (densité = 1)	— 10
Alcool concentré (densité = 0.8059)	— 7.89
Sulfure de carbone	— 13.30
Chlorure de sodium (densité = 1.2084)	— 11.28
Chlorure de magnésium (densité = 1.3197)	— 12.05
Sulfate de cuivre cristallisé du commerce (densité = 1.1265)	+ 8.14
Sulfate de nickel (densité = 1.0827)	+ 21.60
Protosulfate de fer préparé par le sulfate cristallisé du commerce (densité = 1.1923)	+ 211,16
Protosulfate de fer préparé par l'acide sulfurique et le fer (densité = 1.1728)	+ 180.22
Protochlorure de fer, n° 3, préparé par l'acide chlorhydique et le fer (densité = 1,0695)	+ 91.93
Protochlorure de fer, n° 1 (densité = 1,2767)	+ 360.70

Protochlorure de fer, n° 2, concentré (densité = 1.4334). . . + 658,13
Protosulfate de fer avec léger excès d'acide sulfurique (densité = 1.1587). . . . . + 137.70

Dans ce dernier tableau, qui ne renferme que des liquides, on a déterminé par différence l'effet que ces dissolutions éprouvent de la part du magnétisme, au moyen d'une substance solide, toujours la même, qu'on soumet à l'action de l'aimant, en la plongeant dans les différents liquides. On arrive aux mêmes résultats, en se servant pour ces déterminations d'un corps solide quelconque, pourvu qu'il demeure le même dans toutes les expériences comparatives.

Tous les nombres dans les deux tableaux sont, comme nous l'avons dit, rapportés aux volumes; en les divisant par les densités, on aurait les pouvoirs magnétiques à égalité de poids. Cette opération a été faite dans le tableau de M. Plucker; elle nous paraît inutile à faire ici, vu que les résultats obtenus par ces deux phycisiens diffèrent trop entre eux pour qu'il soit possible de les comparer d'une manière utile. Ajoutons qu'en mélangeant, en diverses proportions, de la limaille de fer très-fine et très-pure avec de la cire blanche, et en en formant des petits cylindres de 5 centimètres de longueur et d'un centimètre au moins de diamètre, M. Becquerel est parvenu, par la comparaison de l'action exercée sur eux par l'aimant avec celle qui avait lieu sur un tube de même grandeur rempli de protochlorure de fer, à déterminer les pouvoirs magnétiques du protochlorure de fer et de l'eau par rapport au fer, à volume et à poids égal. Pour arriver à cette détermination, il avait cherché en tâtonnant quelle était la proportion de fer que devait renfermer le cylindre de cire pour éprouver la même action que le volume égal de protochlorure de fer; il avait trouvé que c'était 1/5 de milligramme par centimètre cube, d'où il en avait déduit les pouvoirs magnétiques suivants à poids égal :

Fer.	+	1,000,000
Protochlorure de fer n. 1 .	+	140
Eau.	—	3

Les fluides élastiques sont comme les solides et les liquides

soumis à l'action de l'aimant. Une expérience curieuse faite à Gênes, par le père Bancalari en 1846, est venue démontrer en effet que cette classe de corps n'est point aussi indifférente qu'on aurait pu le croire à l'action magnétique. M. Bancalari avait trouvé que les pôles d'un électro-aimant ont une action répulsive prononcée sur la flamme d'une lampe, sur la fumée, ainsi que sur les vapeurs d'eau et d'alcool. M. Zantedeschi, en répétant et confirmant ces expériences, prouva que la flamme est repoussée également par chacun des pôles, que l'effet n'est point dû à des courants d'air, que la répulsion est accompagnée d'une dépression de la flamme. Le même physicien a encore observé que la fumée qui s'élève du lumignon d'une flamme éteinte, alimentée par l'huile, l'alcool ou la cire, est soumise à la même force répulsive.

M. Faraday, dès qu'il eut connaissance des expériences de MM. Bancalari et Zantedeschi, reprit, d'après un nouveau mode d'expérimentation, ses recherches sur les gaz, et parvint à des résultats qui lui montrèrent, contrairement à ce qu'il avait d'abord cru, que les fluides élastiques ne sont point insensibles à l'action de l'aimant, mais qu'il existe des différences sensibles entre les divers fluides élastiques quant à leurs propriétés magnétiques ou diamagnétiques.

Il s'assura d'abord que l'air chaud est fortement diamagnétique par rapport à l'air froid. Il parvint à ce résultat, en plaçant entre les deux pôles de l'électro-aimant, mais un peu au-dessous de leur surface, une hélice en platine, rendue fortement incandescente par un courant électrique. Tant que l'électro-aimant n'était pas aimanté, le courant d'air chaud s'élevait régulièrement entre les deux pôles, mais aussitôt qu'on produisait l'aimantation on s'apercevait, au moyen de thermomètres, et même simplement à la sensation éprouvée par les doigts, que le courant ascendant d'air chaud se divisait en deux courants, montant séparément des deux côtés de la ligne axiale, et qu'il y avait entre eux un courant d'air froid descendant entre les pôles. L'expérience inverse fut faite, c'est-à-dire qu'en faisant passer un courant d'air dans un tube entouré d'un mélange frigorifique, on trouva, au moyen d'un thermoscope

placé au-dessous des pôles de l'électro-aimant, que ce courant était porté sur la ligne axiale; nouvelle preuve que l'air chaud est plus diamagnétique que l'air froid.

Pour opérer sur les divers gaz et reconnaître la direction qu'ils prenaient dans le champ magnétique, M. Faraday se servit de tubes en verre, ouverts aux deux bouts, larges d'environ 1 centimètre, et longs de 6 à 7, disposés de différentes manières, autour, au-dessus et au-dessous des pôles de l'électro-aimant, et renfermant intérieurement un peu de papier humecté avec de l'ammoniaque. Chaque gaz soumis à l'expérience était lui-même mélangé avec une très-légère quantité d'acide muriatique, quantité non suffisante pour donner seule des vapeurs blanches dans l'air, mais capable d'en produire par son mélange avec l'ammoniaque. De cette façon l'apparition de la fumée blanche indiquait dans quel tube le gaz avait passé, d'où il était facile de conclure quelle direction il avait suivie, et en conséquence s'il était magnétique ou diamagnétique par rapport au milieu ambiant. Des précautions avaient été prises pour éviter toute agitation de l'air autour des pôles de l'aimant. On avait également soin de faire arriver les gaz plus légers que l'air, au-dessous des pôles, et de placer au-dessus les vases destinés à les recevoir, et de faire l'inverse pour les gaz plus pesants que l'air.

Un courant d'oxygène qui descendait verticalement entre les pôles ne fut nullement affecté par l'aimantation de l'électro-aimant, mais le courant du gaz ayant été légèrement déplacé et mis en dehors de la ligne axiale, on le vit, sous l'influence magnétique, se rapprocher de cette ligne et descendre dans le tube placé directement au-dessous d'elle, et non dans celui où il descendait avant l'aimantation de l'électro-aimant. Ainsi l'air est plus diamagnétique que l'oxygène; c'est l'inverse pour l'azote, et en général pour les autres gaz, que M. Faraday a trouvés être plutôt diamagnétiques par rapport à l'air, mais d'une manière trop peu prononcée pour qu'on puisse établir avec quelque certitude des différences entre eux à cet égard.

A peine Faraday avait-il publié ses nouvelles recherches que M. E. Becquerel obtenait de son côté des résultats très-im-

portants sur les propriétés magnétiques des gaz, en observant la répulsion exercée par les pôles de l'électro-aimant sur un barreau de verre très-mince fermé à ses deux extrémités à la lampe à émailleur, plongé successivement dans différents milieux gazeux; ce barreau avait 35 millimètres de longueur, 7 de diamètre, et pesait $0^{gr},742$; il était légèrement magnétique. Dans l'air il était moins attiré que dans le vide, ce qui semblait indiquer que l'air était un milieu magnétique. L'attraction du verre étant diminuée dans l'air, la répulsion d'un corps diamagnétique tel que le soufre, devait être au contraire plus forte dans l'air que dans le vide; c'est ce que l'expérience confirma. L'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique n'en donnèrent aucun effet appréciable; mais l'oxygène manifesta la même propriété que l'air, et cela avec une intensité cinq fois plus considérable; ce qui prouve que c'est sa présence qui donne à l'air sa propriété magnétique, d'autant plus que l'azote est insensible à cette action. Ainsi voilà une preuve expérimentale directe, que l'oxygène est attirable à l'aimant à la manière du fer, et qu'il est même assez fortement magnétique.

Pour déterminer plus exactement le pouvoir magnétique de l'oxygène, M. Becquerel a pris un petit tube de verre qu'il a rempli de cire fondue; le verre étant légèrement attiré et la cire étant repoussée par l'électro-aimant, il a eu ainsi un corps à peu près indifférent, plutôt un peu diamagnétique. Il a déterminé l'effet de l'aimant sur le tube de verre dans le vide, dans l'air, et dans l'oxygène et dans l'eau, il a trouvé :

Dans le vide.	—0.1145
Dans l'oxygène.	—0.2675
Dans l'air.	—0.1453
Dans l'eau.	+0.7033

ce qui donne pour la force magnétique de l'oxygène par rapport à l'eau dans le vide +1,871, et par rapport à l'eau dans l'air + 1,80. Ainsi à volume égal et à la pression de $0^{m},76$, le pouvoir magnétique de l'oxygène est $^1/_8$ de celui de l'eau, mais pris en signe contraire, l'oxygène étant attiré par l'aimant,

tandis que l'eau est repoussée; une méthode un peu différente a donné 1,73 au lieu de 1,80.

Enfin M. E. Becquerel a étudié l'action de l'aimant sur les gaz en les condensant dans une substance poreuse telle que le charbon. Il avait préparé des cylindres de charbon de bois de chêne, de 30 à 35 millimètres de longueur, et de 10 de diamètre qui étaient calcinés au rouge dans du sable, avant chaque expérience. Repoussés dans le vide, ces cylindres étaient fortement attirés dans l'air et surtout dans l'oxygène dont ils absorbent 9 fois environ leur propre volume. Il est probable que les résultats si variables obtenus par les divers physiciens, en ce qui concerne l'action de l'aimant sur le charbon dans l'air, tiennent à ce qu'absorbant de l'air et de l'eau, le charbon doit éprouver des effets différents suivant la proportion de ces substances, l'air lui donnant un pouvoir attractif et l'eau un pouvoir répulsif. Les essais tentés avec d'autres gaz ont fourni des résultats trop peu prononcés pour qu'on puisse en conclure avec quelque exactitude le pouvoir magnétique ou diamagnétique de ces gaz. Il en est autrement pour l'oxygène et pour l'air : aussi on peut regarder les déterminations suivantes comme bien approchées de la vérité, savoir que le magnétisme spécifique est pour :

	A volume égal.	A poids égal.
L'oxygène à la pression de $0^m,76$. .	+ 1,80	+ 1257
L'air » »	+ 0,38	+ 293
L'eau » »	— 10	— 10

En rapportant ces valeurs au fer, d'après le tableau donné plus haut, où, à poids égal on avait pour l'eau — 3, le fer étant 1,000,000, on a pour le magnétisme spécifique à poids égal :

Fer.	1,000,000
Oxygène.	377
Air.	88

On avait pour le liquide le plus magnétique (le protochlorure de fer) + 140 le fer étant 1,000,000; ainsi l'oxygène est, à poids égal, trois fois plus magnétique que le liquide qui l'est le plus;

c'est donc après les métaux magnétiques (fer, cobalt et nickel) le corps qui l'est le plus à poids égal.

M. Faraday, ayant repris de nouveau ses expériences sur les gaz, imagina un moyen très-délicat de déterminer l'action que l'aimant exerce sur eux. Ce moyen consiste à renfermer les gaz soumis à l'expérience dans des bulles de savon, qui sont attirées ou repoussées par les pôles d'un électro-aimant, suivant la nature du gaz dont elles sont remplies. Il a également introduit les gaz dans des ampoules de verre à parois très-minces, placées elles-mêmes aux extrémités d'une tige horizontale très-mobile, suspendue par son centre de gravité au moyen d'un fil de soie sans torsion. Cette tige étant disposée dans le champ magnétique, on vit le gaz oxygène, avec son enveloppe qui était cependant diamagnétique, se placer axialement, tandis que l'azote se plaçait équatorialement, mais avec moins d'énergie; l'air se plaçait aussi axialement, mais moins fortement que l'oxygene. En fixant aux extrémités de la tige, d'une part, une ampoule pleine d'oxygène, d'autre part, une ampoule pleine d'un autre gaz, on avait ainsi un appareil différentiel qui permettait de comparer l'oxygène aux divers gaz; mais le magnétisme de l'oxygène, à volume et à pression égale, l'emportait toujours, et la tige se plaçait axialement et non équatorialement. Quoique le gaz oxygène perde une grande partie de son pouvoir par la raréfaction, une ampoule dans laquelle on avait fait le vide, après qu'elle avait renfermé de l'oxygène, compensait l'effet diamagnétique d'une ampoule pleine d'azote sous la pression ordinaire. Au reste, sauf l'oxygène et l'air, les autres gaz ne présentèrent que des effets bien incertains à M. Faraday; leur pouvoir diamagnétique, si tant est qu'ils en aient un, n'était point altéré par leur raréfaction, ce qui me paraît démontrer que la position équatoriale que prenaient les ampoules remplies de ces gaz tenait uniquement à la nature de leur enveloppe et à ce que les expériences avaient lieu dans l'air, fluide magnétique lui-même. C'est à cette dernière cause que seraient également dus les résultats obtenus précédemment par M. Faraday sur le diamagnétisme apparent de certains gaz. Au reste, ce physicien reconnaît dans son dernier

travail qu'aucun gaz et aucune vapeur (et il en a soumis à l'expérience un grand nombre) ne sont à comparer à l'oxygène, quant à l'action que l'aimant exerce sur eux, et il paraît disposé à les regarder comme indifférents à cette action, sauf peut-être le gaz oléfiant et le cyanogène.

M. Faraday a encore employé le même procédé que nous venons de décrire à déterminer de nouveau plus exactement qu'il ne l'avait fait à l'origine de ses recherches, les pouvoirs magnétiques et diamagnétiques de quelques corps autres que les fluides élastiques. Il faisait usage, dans ses expériences, d'un gros aimant construit par M. Logeman, d'après les principes du docteur Elias, pesant un peu plus de 100 livres, et capable d'en supporter 430. Voici le tableau des résultats dans lesquels les angles de torsion nécessaires pour faire équilibre à la force attractive et répulsive de l'aimant, expriment les pouvoirs magnétiques et diamagnétiques des diverses substances à volume égal.

Prot. ammon. de cuivre.	134°.83	Camphre.	82°.59
Perammon. de cuivre. .	119.83	Camphine.	82.96
Oxygène.	17. 5	Huile de lin.	85.56
Air.	3. 4	Huile d'olive.	85. 6
Gaz oléfiant.	0. 6	Cire.	86.73
Azote.	0. 3	Acide nitrique. . . .	87.96
Le vide.	0. 0	Eau.	96. 6
Gaz acide carbonique. .	0. 0	Solution d'ammoniaque.	98. 5
Hydrogène.	0. 1	Sulfure de carbone. . .	99.64
Ammoniaque.	0. 5	Solution saturée de nitre,	100.08
Cyanogène.	0. 9	Acide sulfurique. . . .	104.47
Verre.	18. 2	Soufre.	118.
Zinc pur.	74. 6	Chlorure d'arsenic. . .	121.73
Éther.	75. 3	Borate de plomb fondu.	136. 6
Alcool absolu. . . .	78. 7	Bismuth.	1967. 6
Essence de citron. . .	80.		

M. Plucker, qui avait d'abord cru que l'air et l'oxygène étaient diamagnétiques, a reconnu plus tard le magnétisme de l'oxygène; il a également constaté que deux des composés nitreux étaient magnétiques, savoir : le deutoxyde d'azote et l'acide nitreux à l'état de gaz, ce qui tient probablement à ce que ce sont des combinaisons moins fortes que les autres; il a également remarqué qu'il suffit de la présence d'un peu d'oxy-

gène libre dans un gaz pour le rendre attractif à l'aimant.

Ajoutons que M. Plucker s'est assuré, comme MM. E. Becquerel et Faraday, que le magnétisme de l'oxygène et en général des mélanges et des combinaisons magnétiques est proportionnel à la densité du gaz. Il avait opéré dans toutes ses expériences avec une boule de verre, dont le faible magnétisme était compensé par celui de l'air environnant, de sorte que l'action de l'aimant sur la boule vide d'air était parfaitement nulle; elle avait 45 mill. de diamètre, et ne renfermait, à la pression ordinaire, qu'un volume d'oxygène pesant 57 milligrammes. L'attraction exercée sur ce gaz par l'électro-aimant était équivalente à un poids de 20 milligrammes, ce qui donne à M. Plucker pour le magnétisme spécifique de l'oxygène, rapporté à poids égal à celui du fer pris pour unité, 0,003,500 au lieu de 0,000,377 trouvé par M. E. Becquerel. M. Faraday donne dans le tableau que nous venons de rapporter 17,5 pour le magnétisme de l'oxygène, le diamagnétisme de l'eau étant 96,6; ce qui conduit à + 1,81 pour l'oxygène, l'eau étant — 10. Or, ce résultat est parfaitement d'accord avec celui de M. E. Becquerel (p. 493); preuve que c'est son chiffre et non celui de M. Plucker qui doit être admis.

Ainsi il résulte également des expériences de MM. E. Becquerel, Faraday et Plucker, que l'oxygène est un corps éminemment magnétique, et que, quant aux autres gaz, si on en excepte quelques-uns qui sont magnétiques à cause de l'oxygène qu'ils renferment, la plupart n'éprouvent de la part de l'aimant aucune espèce d'action, le diamagnétisme qu'on a cru y remarquer n'étant qu'apparent et provenant, comme nous l'avons remarqué, de ce qu'on opère dans l'air, fluide magnétique.

Nous donnerons encore, avant de terminer ce paragraphe, la description de l'appareil que M. Plucker a employé dans ses diverses expériences, appareil assez semblable à ceux dont ont fait usage les autres physiciens qui se sont occupés de ce sujet, et nous ferons suivre cette description de celle des résultats curieux que le savant physicien allemand a obtenus en soumettant les flammes et les liquides à l'action de son fort électro-aimant.

Cet électro-aimant (fig. 158) est surmonté d'une balance de

Coulomb avec le fil de suspension; on peut remarquer qu'il est formé par quatre gros fils de cuivre recouverts de soie enroulée

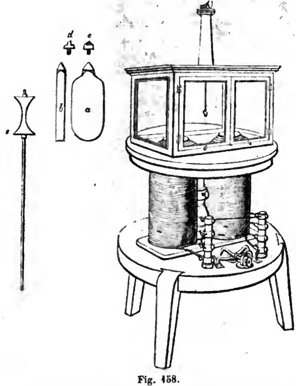


Fig. 158.

séparément autour de ses deux branches, et que les bouts de chacun des fils aboutissent à autant d'anneaux métalliques qu'il y a de bouts. Ces anneaux sont fixés les uns au-dessus des autres, sur deux tiges isolantes, de manière à ne point communiquer métalliquement entre eux. Par une combinaison de conducteurs facile à comprendre, on peut mettre les quatre fils parallèlement dans le circuit, ou les y mettre de façon que le courant les parcoure successivement, soit tous, soit seulement deux ou trois; et même il est facile de s'arranger de manière qu'un seul soit dans le circuit. Un commutateur placé entre les deux petites colonnes auxquelles aboutissent les extrémités des

quatre fils permet de changer facilement la direction du courant.

C'est au moyen de cet électro-aimant que M. Plucker a fait toutes ses expériences, soit sur les flammes, soit sur les liquides, soit sur les corps solides, et en particulier sur les cristaux. Mais, avant d'en exposer les détails, nous devons remarquer que la pièce *e* de la figure 158 représente un thermoscope à air, dont le réservoir est fait de lames de laiton très-minces et de forme concave, contre lesquelles viennent s'appliquer exactement les deux parties convexes des armatures servant de pôles à l'électro-aimant, entre lesquelles il est ainsi placé. Celles-ci se trouvent par là rapprochées à une distance de 5 millimètres l'une de l'autre. Après avoir attendu que l'équilibre de température se soit bien établi, on aimante avec dix couples de Grove l'électro-aimant, et aussitôt on voit la goutte d'alcool coloré, qui, se mouvant dans le tube de verre, sert d'index au thermoscope, sembler indiquer, par une dépression de 2 à 3 millimètres, que le volume de l'air a augmenté; puis le courant étant interrompu, la goutte reprend immédiatement sa place primitive.

M. Plucker avait cru pouvoir conclure de cette expérience que l'air est diamagnétique, puisqu'il est repoussé par les deux pôles de l'aimant; mais il a dû renoncer à cette conclusion, lui-même ayant reconnu que l'air et l'oxygène sont magnétiques. Son erreur provenait évidemment de l'action répulsive exercée par les pôles de l'aimant sur les parois métalliques très-minces de son thermoscope, Faraday ayant démontré, par une série d'expériences très-exactes, que les gaz n'éprouvent aucun changement de volume sous l'action des plus forts électro-aimants. Au reste, il est une classe de phénomènes se rattachant au même sujet, dont M. Plucker a fait une étude particulière, ce sont les changements de forme très-remarquables qui résultent, pour les gaz visibles tels que les flammes, et pour les liquides, c'est-à-dire en général pour les fluides, de l'action exercée sur eux par les pôles de l'électro-aimant.

Quand il s'agit des flammes, il faut, pour faire ce genre d'expériences, enlever la partie supérieure de la cage de verre, pour qu'elle ne soit pas altérée par la chaleur ou la fumée provenant

de la combustion, mais en conserver les faces latérales, afin d'empêcher, autant que possible, la forme que prend la flamme d'être troublée par l'agitation de l'air. Il faut aussi ajuster aux deux armatures de l'électro-aimant (fig. 158 *a* ou *b*), à la place des pointes coniques qui les terminent, les pointes plus aiguës *c* et *d*, puis on les rapproche à une distance de 15 millimètres environ l'une de l'autre, de façon qu'elles soient aux 2/3 ou aux 7/8 de la hauteur de la flamme interposée entre elles. Les figures 159 et 159 *a*, 160 et 160 *a* représent respectivement les

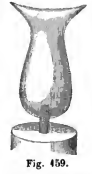


Fig. 159.



Fig. 159 *a*.

coupes équatoriales et axiales de la flamme d'une chandelle de suif soumise à l'influence des deux pointes polaires, celles-ci étant à la distance de 15 millimètres l'une de l'autre, et successivement aux 7/8 et à la moitié de la hauteur de la flamme. La



Fig. 160.

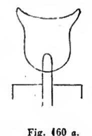


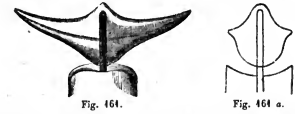
Fig. 160 *a*.



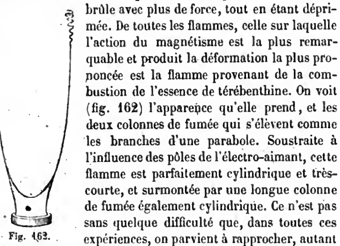
Fig. 160 *b*.

figure 160 *b* représente la flamme, dans ce dernier cas, vue de haut en bas; elle a la forme d'un anneau elliptique qui entoure un espace obscur et est entouré lui-même par un anneau étroit et peu éclairé. Les figures 161, 161 *a* représentent la coupe

équatoriale et axiale de la flamme, quand les deux pointes polaires sont à la hauteur de l'extrémité supérieure de la mèche.


Fig. 161. Fig. 161 *a*.

Avant que l'électro-aimant soit aimanté, la présence de ces pointes de fer, refroidissant la flamme, fait qu'elle ne brûle pas avec tout son éclat; mais aussitôt que le courant électrique est établi, et que, par conséquent, l'aimantation est produite, la flamme, non-seulement reprend son éclat primitif, mais même brûle avec plus de force, tout en étant déprimée. De toutes les flammes, celle sur laquelle l'action du magnétisme est la plus remarquable et produit la déformation la plus prononcée est la flamme provenant de la combustion de l'essence de térébenthine. On voit (fig. 162) l'apparence qu'elle prend, et les deux colonnes de fumée qui s'élèvent comme les branches d'une parabole. Soustraite à l'influence des pôles de l'électro-aimant, cette flamme est parfaitement cylindrique et très-courte, et surmontée par une longue colonne de fumée également cylindrique. Ce n'est pas sans quelque difficulté que, dans toutes ces expériences, on parvient à rapprocher, autant que cela est nécessaire, les deux pointes polaires, sans que leur attraction mutuelle les amène au contact.


Fig. 162.

Nous avons dit que M. Plucker avait également réussi à démontrer le magnétisme et le diamagnétisme des liquides dont les particules sont au reste mobiles comme celles des fluides élastiques, au moyen des changements de forme que détermine chez eux l'influence magnétique. Il faut pour cela mettre le liquide dans un verre de montre très-mince, et placer ce verre

de montre de manière qu'il repose à la fois sur les deux armures de l'électro-aimant, qu'on tourne de façon qu'elles présentent chacune, du côté où elles se regardent, un contour légèrement arrondi, tel que le contour inférieur de la pièce *a* de la figure 158. Si l'on verse dans le verre de montre un liquide magnétique, par exemple du chlorure de fer, de façon qu'il présente, dans sa partie supérieure, une surface circulaire de 25 millimètres de diamètre environ, on le voit prendre successivement des formes qui dépendent de la proximité plus ou moins grande des deux armures polaires. Dans toutes les figures qui suivent, deux arcs de cercle, décrits avec de grands rayons et marqués en traits plus fins, représentent les bords des deux armures sur lesquelles repose le verre de montre; les lignes ponctuées, les coupes horizontales et verticales du liquide avant que les armures soient aimantées; et les lignes pleines et fortes, ces mêmes coupes quand l'aimantation fait sentir son influence.

On voit, dans les figures 163, 164, 165 et 166, qui repré-

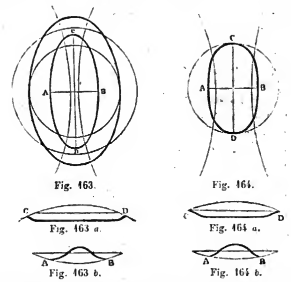


Fig. 163. Fig. 164.

Fig. 163 *a*. Fig. 164 *a*.

Fig. 163 *b*. Fig. 164 *b*.

sentent les coupes horizontales du liquide, que, lorsque les armures sont très-rapprochées, il prend une forme elliptique,

allongée dans le sens équatorial, et change de forme en s'allongeant dans l'autre sens à mesure qu'on éloigne les armures.

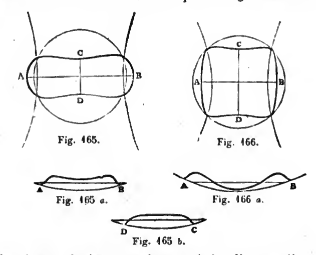


Fig. 165. Fig. 166.
Fig. 165 *a*. Fig. 166 *a*.
Fig. 165 *b*.

Celles-ci sont placées successivement à des distances l'une de l'autre de 2, 5, de 10, de 15, de 23 et de 31 millimètres. Les mêmes chiffres réprésentent, dans chaque cas, les coupes verticales du liquide, ceux affectés de la lettre *a* dans le sens de l'axe, ceux affectés de la lettre *b* dans le sens perpendiculaire à l'axe, soit équatorial. La figure 166 n'a point de coupe verticale dans le sens équatorial, vu que cette coupe se réduit à une simple ligne droite. La masse du liquide demeure constamment la même dans toutes les expériences.

A la distance de 15 millimètres (fig. 165) le liquide se contracte aussi bien dans le sens équatorial que dans le sens axial; dans ce dernier sens sa convexité diminue et elle se change en concavité dans le premier. Quant à la coupe verticale dans le sens de l'axe (fig. 165 *a*), elle indique un creux comme une vallée au milieu, avec deux protubérances près des bords exactement aux points qui correspondent en projection verticale aux arêtes des armures. La coupe verticale dans le sens perpendiculaire à l'axe (fig. 165 *b*) continue à être une ligne droite terminée à ses deux extrémités par deux légères courbures. La fig. 166, qui représente la forme du liquide quand les armures

sont à la distance de 23 millimètres, indique les mêmes effets mais plus prononcés encore; la contraction en particulier dans le sens équatorial est beaucoup plus forte. Quand la distance est portée à 31 millimètres, les bords des armures se trouvent en dehors du cercle formé par le liquide à son état naturel, ce cercle n'étant que de 25 millimètres de diamètre; il en résulte que la déformation est faible et consiste dans la transformation du cercle en une ellipse légèrement excentrique dans le sens de l'axe.

Si au lieu d'un liquide magnétique on met dans le verre de montre un liquide diamagnétique, ce liquide, quand les armures sont à la distanee de 2mm5, comme dans la fig. 163, prend une figure dont la coupe verticale dans le sens de l'axe est représentée par la fig. 167 et par la fig. 168 quand les deux armures sont à la distance de 15 millimètres, comme dans la fig. 164. On voit que la protubérance qui a lieu à ces petites distances au-dessus des arêtes des armures, quand le liquide est magnétique, est remplacée quand le liquide est diamagnétique par des cavités, mais qui sont moins prononcées, il est vrai, que ne l'étaient les protubérances. Dans les deux cas, le liquide n'obéit plus aux lois de l'hydrostatique par l'effet de l'attraction ou de la répulsion exercée sur ses particules.

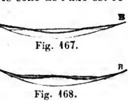


Fig. 167.

Fig. 168.

Pour déterminer si un liquide est magnétique ou diamagnétique, il suffit donc d'en verser une petite quantité dans un verre de montre qu'on place sur les deux armures disposées de manière qu'elles ne soient qu'à quelques millimètres de distance l'une de l'autre. Le liquide subit aussitôt le changement de forme que nous venons de décrire; et de la forme nouvelle, qui est différente dans les deux cas, on conclut que le liquide est magnétique ou diamagnétique. Si le changement de forme n'est pas assez prononcé pour qu'on puisse s'en apercevoir en regardant directement la surface du liquide, on peut le rendre sensible pour peu qu'il existe, par l'image que donne la réflexion sur cette surface, d'un objet éloigné. Il est bon de re-

marquer en terminant ce sujet, que l'arrangement qu'affecte un liquide magnétique sous l'influence des deux pôles est tout à fait analogue à celui que détermine sur une poudre fine magnétique, telle que la limaille de fer, cette même influence; c'est-à-dire que les particules du liquide, comme celles de la poudre, se portent vers tous les points où la force de l'aimant est la plus grande. Avec un liquide diamagnétique, la forme est telle que les particules de liquide semblent fuir les mêmes points. On constate très-bien par ce moyen le diamagnétisme de l'eau, de l'alcool et même du mercure; il faut seulement pour le mercure que la capsule dans laquelle on le met soit intérieurement amalgamée. Il est assez remarquable que, soumise à cette épreuve, la solution rouge de cyanure de potassium se montre magnétique et la jaune diamagnétique, tandis qu'à l'état solide ces deux cyanures sont également diamagnétiques.

§ 4. De l'influence qu'exerce sur l'action de l'aimant l'état moléculaire des corps.

Faraday, comme nous l'avons vu, avait fait de tous les corps deux classes, l'une qu'il avait appelée paramagnétique, renfermant tous ceux qui sont attirés par l'aimant, l'autre qu'il avait nommée diamagnétique, comprenant tous ceux qui sont repoussés. Il n'avait pas remarqué, non plus que les physiciens qui s'étaient occupés de ce sujet après lui, que l'état de division d'un corps modifiât sensiblement ses propriétés magnétiques ou diamagnétiques; on avait observé seulement, comme nous l'avons vu, que l'état de fusion rendait le bismuth moins diamagnétique qu'il l'était à l'état solide. C'est à M. Plucker que l'on doit d'avoir découvert l'influence très-remarquable qu'exerce l'état cristallin d'une substance sur l'action à laquelle elle est soumise de la part de l'aimant.

Le savant physicien allemand ayant voulu chercher jusqu'à quel point la direction des fibres pourrait influer dans les corps organiques sur leurs propriétés magnétiques ou diamagnétiques, fut conduit à se demander si, dans les cristaux, la direction des axes optiques, qui dépend elle-même de l'arrangement

des particules, n'aurait pas aussi une influence. Il soumit d'abord à l'action de l'électro-aimant une lame mince de tourmaline telle qu'on les emploie dans les expériences de polarisation, ayant son axe optique parallèle à sa plus grande longueur. Il s'aperçut bien vite que la lame était magnétique par l'effet du fer qu'elle renferme; mais il la suspendit successivement de trois manières, d'abord de façon que son côté le plus long fût vertical, ensuite de façon que ce fût son plus petit côté qui fût vertical, et enfin de façon que la lame elle-même fût horizontale. Dans le premier cas, elle se dirigea entre les deux pointes des armures coniques des pôles comme un corps magnétique; dans les deux autres, au contraire, elle prit la direction qu'affectent les corps diamagnétiques; c'est-à-dire une direction telle, que sa plus grande longueur était perpendiculaire à la ligne qui joint les pôles. Cette direction indiquait que l'axe optique était repoussé par les deux pôles, et que cette répulsion l'emportait sur les propriétés magnétiques du cristal. D'autres tourmalines provenant de diverses origines, qu'on soumit à l'expérience, aussi bien les transparentes que les opaques, donnèrent le même résultat. Quoique magnétiques, elles se plaçaient, dès qu'elles étaient à une certaine distance des pôles de l'électro-aimant, de façon que leur axe optique fût perpendiculaire à la ligne axiale qui réunit les deux pôles. Il est important de remarquer que la force qui produit la répulsion de l'axe optique diminue d'intensité avec la distance des pôles de l'électro-aimant au cristal, dans une proportion moins rapide que la force magnétique ou diamagnétique qui agit sur la masse entière de la substance. C'est ce qui fait que pour annuler l'effet de cette dernière force et apercevoir celui de la première, il faut éloigner à une certaine distance les pôles magnétiques.

Une lame de spath calcaire fut soumise à la même épreuve; ses deux grandes faces étaient perpendiculaires à l'axe optique, et on la vit d'abord se diriger équatorialement, de façon par conséquent que son axe fût lui-même dirigé axialement; conséquence du diamagnétisme de la substance. Mais les pôles de l'électro-aimant ayant été éloignés, l'axe du cristal prit la

direction équatoriale, comme si la substance elle-même était magnétique. Le béril, la dioptase, la vésuvienne, substances qui toutes sont magnétiques, présentent le même phénomène que la tourmaline et le spath calcaire; n'oublions pas de remarquer que tous ces cristaux doués de la double réfraction sont négatifs, c'est-à-dire que, dans la double réfraction, le rayon extraordinaire est repoussé par l'axe. Quant aux cristaux à deux axes également négatifs, tels que le mica, leurs deux axes sont également repoussés par les deux pôles, ce qui fait qu'ils se dirigent de façon que leur ligne moyenne se place équatorialement. Toutes ces expériences ont été faites avec l'appareil de la fig. 158, dans lequel un fil de cocon terminé par un petit crochet sert à suspendre le cristal entre les deux armatures coniques ajustées aux pôles de l'électro-aimant.

Quelques observations assez incertaines faites sur le quartz et sur le topaze, qui sont des cristaux positifs, c'est-à-dire dans lesquels le rayon extraordinaire est attiré par l'axe, avaient d'abord engagé M. Plucker à étendre à tous les cristaux les lois que nous venons d'énoncer, quand de nouvelles recherches de M. Faraday vinrent établir à cet égard une différence caractéristique entre les diverses substances cristallisées, différences dont de nouvelles recherches de M. Plucker lui-même confirmèrent l'exactitude.

Frappé des irrégularités que lui présentaient quelquefois certains échantillons de bismuth dans l'action que l'aimant exerce sur eux, Faraday s'assura que, quoique toujours fortement diamagnétique, ce métal présente à l'état cristallin une direction particulière. Ayant obtenu par le procédé ordinaire des cristaux de bismuth bien déterminés, et qui pesaient depuis un gramme jusqu'à 5 grammes, il en suspendit un délicatement par un fil de cocon de soie entre les pôles de l'électro-aimant. Un premier échantillon, pesant un peu plus d'un gramme, commença par osciller fortement autour d'une ligne donnée dans la direction de laquelle il se fixa définitivement avec force, y revenant dès qu'on l'en écartait; cette direction était telle que le grand axe du cristal était situé axialement par rapport aux pôles. Un autre échantillon, dont l'axe n'était pas, comme pour le précé-

dent, situé dans la plus grande longueur du cristal, se dirigea équatorialement en apparence, mais toujours de façon que son axe fût situé axialement par rapport aux pôles. En général, des morceaux façonnés de toutes les manières possibles se dirigeaient tous et prenaient une position finale qui n'avait aucun rapport avec la forme extérieure, mais dépendait évidemment de l'état cristallin de la substance. Le bismuth en masse reste toujours fortement diamagnétique, et continue à être repoussé par chacun des pôles de l'aimant, ce qui n'empêche pas son axe de se diriger axialement comme le ferait celui d'une substance magnétique, mais non aimantée; car, pourvu que la direction demeure axiale, peu importe que ce soit l'une ou l'autre des extrémités de l'axe qui soit située vers l'un des pôles ou vers l'autre. Ainsi, la force directrice et la position finale du cristal sont axiales, et le cristal peut se fixer avec une égale facilité et une égale permanence dans deux positions diamétralement opposées; de façon que, entre celles-ci, il existe deux positions d'équilibre équatorial qui sont naturellement instables. C'est ce qui fait que la propriété dont il s'agit s'exprime mieux par les mots *axial* et *axialité* que par les mots *polaire* et *polarité*. M. Faraday a également appelé la ligne suivant laquelle la force directrice s'exerce *ligne magné-cristalline*, pour la distinguer de la force elle-même qu'il appelle *magnéto-cristalline*.

La direction de la force n'est pas facile à déterminer d'avance dans le cristal, quoiqu'elle soit liée avec le mode de cristallisation, mais celui-ci est quelquefois un peu confus. En général, l'expérience montre que la ligne magné-cristalline est perpendiculaire au petit plan de clivage déterminé, en enlevant un des angles solides du cube, qu'on obtient en détachant un cristal isolé de bismuth d'une masse solide. Il est facile de reconnaître la direction de la ligne en suspendant le cristal de différentes manières, parce que toujours il se dirige de façon que cette ligne, ou le plan qui la renferme, soit axial. Si le mode de suspension est tel que la ligne magné-cristalline soit verticale; alors le cristal ne se dirige plus du tout, comme c'était le cas dans les expériences de M. Plucker avec la lame de tourmaline. Il est évident, en effet, que dans cette position, l'axe a tous ses

points situés symétriquement par rapport aux deux pôles magnétiques, et il n'y a pas de raison pour qu'il ne reste pas vertical. On peut facilement, en combinant ensemble plusieurs morceaux de bismuth, par exemple trois plaques égales qu'on dispose rectangulairement l'une à l'autre, obtenir un système qui a perdu tout pouvoir de se diriger sous l'influence de l'aimant, la force étant neutralisée dans toutes les directions. C'est ce qui arrive au bismuth amorphe qu'on obtient en fondant et laissant refroidir tranquillement dans un tube de verre une masse uniforme de cristaux; le morceau ainsi obtenu est sans force magné-cristalline. On a le même résultat en brisant le cristal et en plaçant les fragments ou la poudre dans un tube qu'on soumet à l'action de l'aimant.

Les milieux ambiants n'exercent aucune influence sur la propriété magné-cristalline du bismuth, ce qui établit une différence de plus entre cette action et l'action diamagnétique. M. Faraday n'a pas trouvé que deux cristaux de bismuth, qui tous les deux sont dirigés par un électro-aimant, puissent exercer une influence mutuelle l'un sur l'autre; il a cru trouver des indices qu'un cristal librement suspendu se dirigeait sous l'action magnétique de la terre, de façon que son axe magné-cristallin fût parallèle à peu près à la direction de l'aiguille d'inclinaison.

Un cristal de bismuth se dirige dans une hélice formée d'un fil traversé par un courant électrique, de telle manière que l'axe magné-cristallin est parallèle à l'axe de l'hélice.

L'antimoine et l'arsenic présentent les mêmes phénomènes que le bismuth. Dans l'antimoine, la ligne magné-cristalline qui se place axialement est dirigée, comme dans le bismuth, de l'un des angles solides à l'angle opposé, et est perpendiculaire à la face obtenue, en abattant l'angle du clivage. L'antimoine présente un phénomène singulier qui tient à son pouvoir conducteur pour l'électricité, supérieur, quand le métal est à l'état cristallin, à celui du bismuth. C'est une espèce d'arrêt ou d'action révulsive qu'il éprouve dans son mouvement de direction au moment où l'on interrompt le courant qui aimante l'électro-aimant. Le développement des courants d'induction en

est la cause; aussi cette espèce d'action particulière dépend-elle beaucoup de la continuité de la masse. C'est ce qui fait qu'un large morceau d'antimoine la possède à un plus haut degré que plusieurs petits fragments, et ceux-ci à un plus haut degré que la substance réduite en poudre. Pour se mettre à l'abri de ce mouvement révulsif qui peut quelquefois empêcher la manifestation bien nette du pouvoir magné-cristallin, il est préférable d'employer un aimant ordinaire, qui, plus faible qu'un électro-aimant, suffit pour déterminer la direction de l'axe magné-cristallin, sans avoir l'inconvénient de produire des courants d'induction. Quoi qu'il en soit, si l'on opère sur de petits fragments, et en particulier avec des plaques étroites qui ont autant de force directrice que des plaques larges, mais qui sont défavorables à la production des courants induits, on obtient la direction voulue d'une manière très-évidente. Avec un peu d'attention, on voit également cette direction se manifester lors même qu'on n'a pas pris ces précautions, et on la démêle facilement au milieu des mouvements révulsifs et de l'espèce de résistance que semble éprouver le cristal dans son mouvement.

Quant à l'arsenic, quoique fortement diamagnétique, il n'en possède pas moins à l'état cristallin la force magnéto-cristalline. Une plaque dont les faces de clivage étaient bien planes, placée devant l'un des pôles de l'électro-aimant, fut fortement repoussée; mais, suspendue entre les deux pôles, elle se dirigea immédiatement de manière que sa ligne magné-cristalline fût axiale.

C'est en vain que M. Faraday a essayé de découvrir dans d'autres métaux à l'état cristallin la force magnéto-cristalline; il n'y a pu réussir, sauf peut-être avec deux alliages, l'un d'iridium et d'osmium, l'autre, de titane et de tellure, qui lui en ont donné quelques signes. Mais par contre le sulfate de fer et celui de nickel à l'état cristallin manifestèrent clairement une direction magnéto-cristalline, complétement indépendante de leurs propriétés magnétiques.

Il est facile de voir que les expériences de Faraday sont tout à fait du même ordre que celles de Plucker; aussi ce dernier physicien a-t-il été conduit à admettre que parmi les cristaux il en est dont l'axe est attiré, comme il en est dont l'axe est re-

poussé par les pôles magnétiques. Les cristaux étudiés par M. Faraday appartiennent à la première catégorie, ceux sur lesquels M. Plucker avait fait ses premiers essais appartiennent à la seconde. Or les cristaux de bismuth, d'antimoine et d'arsenic, ont la forme de rhomboïdes, ils sont par conséquent à un seul axe; mais comme ils ne sont pas transparents. on ne peut savoir s'ils sont négatifs ou positifs. D'un autre côté, en soumettant à l'expérience d'autres cristaux, M. Plucker crut être parvenu à cette loi simple, savoir que si le cristal est positif, il y a attraction, c'est-à-dire que l'axe optique se dirige axialement, tandis que si le cristal est négatif, il y a répulsion, et l'axe se dirige équatorialement. D'après cela, les cristaux de bismuth, d'antimoine et d'arsenic seraient positifs comme le sont le quartz, la diopside, l'augite. Toutefois, M. Plucker n'est pas d'accord avec M. Faraday, sur la place à donner à l'antimoine; il croit qu'il doit être classé dans le nombre des cristaux dont l'axe repoussé se place équatorialement; cette divergence entre ces deux physiciens tient à la difficulté de bien déterminer l'axe dans des cristaux non transparents; je suis disposé à croire avec M. Faraday, que, pour l'antimoine comme pour le bismuth, la ligne magné-cristalline se place axialement. M. Plucker a fait un grand nombre d'observations avec la cyanite, qui est un des cristaux qui manifestent le mieux ce genre d'effet : elle se dirige axialement. La cyanite est un cristal à deux axes, et c'est la ligne moyenne qui affecte la direction voulue. De toutes ces expériences, M. Plucker crut donc pouvoir déduire les deux lois suivantes :

1° Les pôles magnétiques attirent ou repoussent l'axe optique d'un cristal à un axe suivant qu'il est positif ou négatif;

2° Dans les cristaux à deux axes, la ligne moyenne est attirée ou repoussée par les pôles; conséquence de ce que dans les cristaux positifs les deux axes optiques sont attirés, et dans les négatifs repoussés avec une force égale.

Une chose assez remarquable c'est qu'un cristal de cyanite délicatement suspendu à un fil de cocon est influencé par le magnétisme terrestre comme il l'est par un aimant, et en conséquence prend la même direction que prend une véritable

aiguille aimantée. Il n'est pas nécessaire que les cristaux de cyanite aient été préalablement soumis à l'action d'un aimant pour acquérir cette propriété; ils la possèdent d'eux-mêmes. Il paraît que le magnétisme terrestre développe chez eux une véritable polarité, car c'est toujours la même extrémité qui se dirige vers le nord, et la même vers le sud. Mais de tous les cristaux, celui qui est le plus fortement dirigé par le magnétisme terrestre, c'est la stannite, soit oxyde de zinc; c'est un cristal positif à un axe, dont l'axe optique est perpendiculaire à sa plus grande dimension, d'où il suit que lorsqu'il est dirigé par le globe terrestre, l'une de ses extrémités est tournée vers l'est et l'autre vers l'ouest. Ce même cristal présente un phénomène que les autres n'ont pas pu nous offrir : c'est que lorsqu'on l'approche d'une aiguille aimantée délicatement suspendue, de façon que son axe soit très-rapprochée de cette aiguille et lui soit parallèle, il entraîne cette aiguille avec lui, surmontant ainsi la force directrice du globe. M. Faraday, en prenant beaucoup de précautions, avait déjà obtenu, comme nous l'avons vu, le même résultat avec un cristal de bismuth; mais l'effet était beaucoup moins prononcé.

M. Plucker est parvenu, au moyen de l'influence magnétique, à déterminer, non-seulement si un cristal a un axe optique, mais aussi quelle est la direction de cet axe. Il suffit pour cela de suspendre le cristal entre les deux pôles de l'électro-aimant, d'abord d'une manière, et ensuite de l'autre; et on conclut de la position que prend le cristal dans chacun de ces modes de suspension, la direction de son axe, de la même manière qu'on détermine le centre de gravité d'un corps. Ainsi, si c'est un cristal négatif, on détermine l'intersection des deux plans équatoriaux, et la ligne qui résulte de cette intersection est l'axe cherché. Si le cristal est positif, l'axe est la ligne que produit l'intersection des deux plans axiaux, obtenus également en suspendant le corps de deux manières différentes. Quand le cristal est à deux axes, on trouve d'abord le plan des deux axes, qui est axial ou équatorial, suivant que le cristal est positif ou négatif; puis on obtient chacun des deux axes, pourvu qu'on connaisse l'angle qu'ils forment entre eux. On voit, d'après cela, que

l'influence magnétique peut prendre rang parmi les caractères cristallographiques les plus importants.

Les phénomènes magnéto-cristallins dont nous venons de parler ne sont pas du reste les seuls qui soient liés dans les cristaux avec la direction et la nature de leurs axes. Indépendamment des phénomènes optiques qui ont été les premiers reconnus et étudiés, il en est d'autres qui dépendent également de la position des axes. Ainsi, Savart, en faisant vibrer des plaques cristallines de quartz et de carbonate de chaux, est parvenu à déterminer une relation entre les figures acoustiques qui s'y produisent et le mode particulier de cristallisation de la substance. Il a trouvé que la direction de l'axe optique est constamment liée avec celle des figures principales des figures acoustiques. Quant à la structure moléculaire des cristaux, il résulte des mêmes expériences que la seule différence qu'il paraisse y avoir entre la chaux carbonatée et le quartz, c'est que dans le premier de ces cristaux, la petite diagonale du rhomboïde est l'axe de moindre élasticité de la substance, tandis qu'elle est celui de plus grande élasticité dans le second. Cette différence importante, qui indique un arrangement des particules non identique dans les deux systèmes, doit nécessairement exercer une influence sur les phénomènes de lumière qui sont propres à chacun; on sait en effet que l'un est un cristal à double réfraction négative, et l'autre, à double réfraction positive.

M. Mitscherlich avait remarqué que les cristaux ne se dilatent point uniformément par l'effet de la chaleur, mais que cette dilatation est plus grande dans un sens que dans l'autre, et que cette différence est liée avec leur forme cristalline. M. de Sénarmont a dernièrement observé un fait non moins remarquable, c'est que la conductibilité pour la chaleur, qui est égale en tous sens dans les cristaux du système régulier, prend dans les autres une valeur maximum ou minimum suivant des directions parallèles aux axes cristallographiques, de sorte que les surfaces isothermes, qui sont sphériques dans le premier cas, sont dans les autres des surfaces d'ellipsoïdes allongés ou aplatis dans ces mêmes directions. Ces observations montrent l'ana-

logie qui existe entre la propagation calorifique et la propagation lumineuse, qui, l'une et l'autre, sont égales en tous sens dans les cristaux du système régulier, et qui, dans les autres, prennent une valeur maximum ou minimum suivant l'axe de figure. Les axes optiques ne coïncident pas tout à fait avec les axes principaux de conductibilité pour la chaleur, mais cette coïncidence est bien près d'exister si l'on prend les rayons lumineux rouges dont les longueurs d'ondulation se rapprochent le plus de celles des rayons calorifiques. Il suffit donc, pour rendre compte des phénomènes observés par M. de Sénarmont, de supposer la chaleur comparable, non aux radiations lumineuses ordinaires, mais à des radiations jouissant des propriétés du rouge extrême, supposition confirmée par un grand nombre d'autres faits. D'après ce système, l'ellipsoïde thermique doit être aplati dans les cristaux attractifs, et allongé dans les répulsifs, ce qui jusqu'à présent s'est trouvé conforme aux résultats des expériences.

Enfin, M. Wiedemann, en employant une pointe fine par laquelle il faisait arriver l'électricité sur une surface qu'il avait saupoudrée avec du lycopode ou du minium, a réussi à déterminer, au moyen de la figure que forme cette poudre légère, la conductibilité électrique des cristaux suivant différentes directions. Sur une surface de verre, la poudre qui se disperse autour de la pointe, à la suite de la répulsion électrique, forme une figure circulaire, traversée par des rayons semblables aux figures de Lichtemberg. Lorsqu'on remplace la surface de verre par une paillette de gypse, on trouve que la figure devient elliptique, et que le grand axe de l'ellipse forme un angle droit avec l'axe cristallographique principal, ce qui prouve que l'électricité se distribue plus facilement dans une direction perpendiculaire à l'axe que dans tout autre. Dans le quartz, la figure est également allongée dans une direction perpendiculaire à l'axe. Dans la tourmaline et la chaux carbonatée, au contraire, l'allongement de la figure a lieu dans une direction parallèle à l'axe principal. M. Wiedemann tire de ces diverses observations la conclusion que les cristaux qui possèdent une meilleure conductibilité dans le sens de l'axe principal

appartiennent tous à la classe des cristaux négatifs, tandis que ceux qui ont une meilleure conductibilité dans le sens perpendiculaire à l'axe sont positifs; ce qui indique que la direction de la meilleure conductibilité est aussi celle suivant laquelle la lumière se propage relativement le plus vite. M. de Senarmont a aussi fait des expériences détaillées sur ce sujet; nous y reviendrons en nous occupant de la propagation de l'électricité.

Le coup d'œil rapide que nous venons de jeter sur les principales propriétés physiques des cristaux nous montre le rôle important qu'y jouent les axes optiques. Ce sont ces mêmes axes que nous retrouvons dans les phénomènes magnéto-cristallins; tâchons de voir maintenant quelle est la nature de l'influence qu'ils exercent sur cet ordre de phénomènes.

M. Plucker avait cru pouvoir, comme nous l'avons vu, conclure de ses expériences la loi simple que dans les cristaux négatifs, l'axe optique est repoussé par les pôles magnétiques, que dans les positifs, il est attiré, que par conséquent il se place équatorialement dans le premier cas, axialement dans le second. Quant aux cristaux à deux axes, c'est la ligne moyenne qui partage en deux parties égales l'angle aigu formé par les deux axes qui est repoussée ou attirée, suivant que les cristaux sont eux-mêmes négatifs ou positifs. La cyanite, cristal négatif à deux axes, présente cette propriété d'une manière très-marquée.

Ces lois établies, M. Plucker, partant de la théorie de Fresnel, d'après laquelle les phénomènes optiques des cristaux à un ou à deux axes dépendent de la distribution particulière qu'y affecte le milieu dans lequel la lumière se propage, et que les savants appellent *éther*, avait cru pouvoir rattacher l'attraction et la répulsion exercées respectivement par un aimant sur les axes des cristaux positifs et négatifs à ce fait, que dans les premiers l'axe est le lieu de la moindre élasticité et dans les seconds, celui de la plus grande élasticité de l'éther; mais quelques anomalies présentées en particulier par les cristaux de sulfate de fer l'ont obligé de renoncer à cette idée.

M. Faraday avait été frappé, comme au reste M. Plucker lui-même, de ce qu'il y a d'extraordinaire dans une force qui, émanant des pôles de l'aimant, dirige de loin un prisme de tour-

maline, par exemple, de telle sorte que les extrémités du cristal s'éloigneut des mêmes pôles qui attirent toute la masse. Il avait en conséquence admis que cette force n'est ni attractive, ni répulsive, mais une simple force directrice due à une espèce de radiation qui, émanant des pôles magnétiques, traverse le cristal interposé, et l'oblige, selon qu'il est positif ou négatif, à se placer de façon que son axe soit parallèle ou perpendiculaire à la ligne suivant laquelle cette radiation s'opère. Cette manière d'envisager ce genre d'action avait été suggérée à Faraday par les phénomènes que présente la lumière polarisée quand elle traverse les corps transparents soumis à l'influence magnétique, phénomènes dont nous nous occuperons plus loin. Une circonstance qui, suivant lui, montre la différence qui existe entre les deux espèces de force, c'est la loi différente qu'elles suivent avec la distance, celle qui agit sur toute la masse et qui est attractive ou répulsive, diminuant plus rapidement que celle qui s'exerce sur l'axe optique, et qui n'est que directrice. Des observations faites sur plusieurs cristaux, et notamment sur celui de sulfate de fer, sembleraient inexplicables sans cette manière d'envisager le phénomène.

Il est impossible, cependant, de ne pas remarquer que la théorie de Faraday ne justifie pas mieux que celle de Plucker ce qu'il y a d'extraordinaire à voir un même cristal susceptible de présenter des phénomènes tout contraires, selon qu'on l'envisage dans sa masse ou dans son axe optique. Ces deux physiciens sont également obligés d'admettre que l'axe, en qualité d'axe et indépendamment de la nature même de la substance du cristal, jouit de propriétés particulières le plus souvent en opposition avec celles que possède la substance elle-même, ou qui tout au moins en sont complétement indépendantes. Ils sont donc forcément conduits, contrairement à l'opinion de l'un d'eux, M. Plucker, à reconnaître que l'action magnétique peut s'exercer indépendamment de la matière pondérable, ce qui a lieu quand c'est l'axe qui y est soumis.

Mais il résulte de nouvelles expériences faites par MM. Tyndall et Knoblauch, postérieurement à celles de Plucker et de Faraday, qu'il n'est pas nécessaire d'admettre, comme l'avaient

cru ces deux savants, deux genres d'actions ou de forces différentes. MM. Tyndall et Knoblauch sont parvenus, par une étude très-détaillée du sujet, à reconnaître que les propriétés magnétiques de l'axe optique se rattachent à un principe général, savoir que lorsque la constitution moléculaire d'un corps quelconque est telle que les particules dont il est formé sont plus rapprochées les unes des autres suivant une certaine direction que dans le reste de la masse, cette direction, toutes les autres circonstances restant les mêmes, est celle où les forces qui agissent sur le corps manifestent leur action avec le plus d'énergie; de sorte que la ligne qui représente cette direction se place axialement ou équatorialement, suivant que la substance est magnétique ou diamagnétique. Si cette influence prédominante de l'action exercée sur celles des particules qui sont situées dans la direction en question ne se manifeste pas toujours, cela tient à des circonstances dont il est facile d'expliquer l'effet. Ainsi, lorsque les deux pôles magnétiques se terminent en cônes dont les sommets sont très-rapprochés d'un cristal suspendu entre eux, l'action locale de ces pôles sur les faces du cristal qui en sont très-voisines l'emporte sur celle qui est exercée sur l'axe plus distant, parce que cette dernière, quoique plus forte, s'exerce à une distance proportionnellement beaucoup plus grande; mais si on éloigne les pointes polaires, l'influence de la distance relative des faces et de l'axe du cristal par rapport à ces pointes, devient beaucoup moindre et à peu près nulle; et alors c'est l'action qui est exercée sur l'axe qui l'emporte. La tourmaline nous fournit, comme nous l'avons vu, un exemple remarquable de ce double effet.

Si, au lieu d'être terminés par des pointes, les pôles de l'électro-aimant présentent des surfaces planes un peu étendues entre lesquelles est suspendu le cristal, celui-ci, étant entièrement plongé dans le champ des forces magnétiques, se dirige d'après l'action exercée sur son axe, lors même qu'il est très-rapproché des surfaces polaires.

Dans cette manière d'expliquer ces phénomènes, l'action de l'aimant est toujours exercée sur les particules, et elle est, suivant leur nature, magnétique et attractive, ou diamagnétique

et répulsive. La seule différence qui existe à cet égard entre les cristaux et les autres corps, c'est que, par le fait de leur structure non homogène, les cristaux présentent naturellement certaines directions suivant lesquelles l'action, soit magnétique, soit diamagnétique, est plus énergique que suivant les autres, à cause du rapprochement plus grand des particules qui a lieu suivant ces mêmes directions, phénomène tout à fait analogue à celui de la dilatation par la chaleur, qui, dans un cristal de spath calcaire, par exemple, s'opère plus fortement, d'après Mitscherlich, dans la direction de l'axe optique, parce que les particules, plus rapprochées suivant cette direction que suivant les autres, se repoussent avec plus d'énergie pour une même élévation de la température.

La théorie que nous venons d'exposer est appuyée sur des faits très-nombreux observés et analysés avec beaucoup de soi par MM. Tyndall et Knoblauch; nous nous contenterons d'en exposer quelques-uns en choisissant les plus saillants. D'abord, pour montrer l'influence de la structure par la direction qu'affecte entre les pôles de l'électro-aimant une substance quelconque, il suffit de tailler des morceaux de gutta-percha que la fabrication a rendue fibreuse, de façon que les fibres soient dans le sens de la plus grande longueur ou dans un sens perpendiculaire à cette plus grande longueur, pour les voir se diriger axialement ou équatorialement. L'ivoire, que sa structure dentaire rend naturellement fibreux, peut aussi, suivant la manière dont il est taillé, se diriger axialement, bien que diamagnétique. On peut imiter ainsi, avec la gutta-percha et avec l'ivoire, presque toutes les expériences qu'on fait avec les deux classes de cristaux positifs et négatifs.

Cette influence de la structure devient évidente dans les phénomènes magnéto-cristallins eux-mêmes, quand, au lieu de se borner à quelques espèces, on étend les observations sur un très-grand nombre de cristaux, et en ayant soin, en outre, de les laver et de prendre toutes les précautions possibles pour enlever de leur surface les plus légères traces d'impureté dont la présence suffit pour donner lieu à de graves erreurs. On trouve, par exemple, qu'un cristal de spath calcaire et un cris-

tal de carbonate de fer, qui ont exactement la même forme cristalline, se dirigent cependant, le premier étant diamagnétique, de façon que son axe optique soit situé équatorialement, le second étant magnétique, de façon que son axe soit situé axialement. Il suffit même que, dans le cristal de spath calcaire, une partie de la chaux soit remplacée par un oxyde de fer, comme dans la dolomite, sans que la forme cristalline change, pour que l'axe optique se trouve dirigé axialement d'équatorialement qu'il l'était auparavant. Le sulfate de magnésie et le sulfate de zinc ont exactement la même forme cristalline, et toutes deux sont diamagnétiques; ils se placent de façon que leur axe soit dirigé équatorialement, tandis qu'un cristal de sulfate de nikel, qui a la même forme que les deux autres, a son axe dirigé axialement, lors même qu'il est beaucoup plus étroit dans le sens de l'axe que dans tous les autres. Il résulte donc de là que ce n'est pas la forme cristalline, mais bien la nature chimique du cristal qui est la cause influente.

Un très-grand nombre d'autres cristaux font également exception à la loi de Plucker : ainsi, dans le sucre, qui est un cristal négatif, le plan de l'axe se dirige axialement; la topaze, qui est un cristal négatif, se place axialement et non équatorialement, si on a soin de les dépouiller de toutes les impuretés dont sa surface est ordinairement recouverte, en la faisant bouillir dans l'acide muriatique, et en la frottant ensuite avec du sable blanc très-fin.

En résumé, parmi les cristaux qui n'obéissent pas à la loi de Plucker, nous pouvons citer dans les cristaux positifs à un axe, le quartz, dans les positifs à deux axes, le spath pesant, la célestine et le ferro-cyanure de potassium; parmi les cristaux négatifs à un axe, le carbonate de chaux et de fer et un très-grand nombre d'autres; parmi les cristaux négatifs à deux axes, la dichroïte, le sucre, le sulfate de zinc et le sulfate de magnésie. Il y a par contre un certain nombre de cristaux, tels que le spath calcaire, la tourmaline, le béryl, l'arragonite, qui rentrent dans la loi; ce sont précisément ceux sur lesquels les observations de M. Plucker avaient principalement porté; mais le nombre des exceptions est trop considérable pour que la loi puisse subsis-

ter, tandis que tous les faits sont d'accord avec le principe qui les fait dépendre de la non-uniformité de la constitution moléculaire dans toutes les directions. Au reste, M. Plucker, dans un travail subséquent, fait en commun avec M. Beer, a reconnu lui-même que la loi qu'il avait d'abord cru être générale présente un grand nombre d'exceptions.

Il est facile de montrer comment il suffit d'une direction telle que l'axe, suivant laquelle les particules sont plus rapprochées, pour déterminer la position de toute la masse. Un petit gâteau circulaire, soit disque, fait d'un mélange de farine et de fine limaille de fer, se place naturellement axialement entre les pôles de l'aimant. Si nous le transperçons par un petit fragment de fil de fer passant par son centre, le disque se place équatorialement, quoique magnétique, en vertu de la tendance qu'a le fil de fer à se placer lui-même axialement; mais la répulsion n'est qu'apparente. Si l'on remplace la limaille de fer par de la poudre de bismuth, et le fer par un fragment de bismuth, le phénomène inverse a lieu : le disque, quoique diamagnétique, se place axialement par l'effet de la tendance du fragment de bismuth à se placer lui-même équatorialement, et l'attraction n'est non plus qu'apparente. On peut même imiter artificiellement l'arrangement naturel des particules que suppose cette manière d'expliquer les phénomènes. De la poudre fine de bismuth peut, en étant liée avec de l'eau gommée, être amenée à former un cylindre qui, suspendu entre les pôles magnétiques, se dirige équatorialement; mais si l'on presse très-fortement cette espèce de pâte entre deux morceaux de carton, on en fait une plaque mince qui se dirige axialement avec beaucoup de force, quoique sa longueur soit plus de dix fois son épaisseur. Dans les mêmes conditions, une pâte de carbonate de fer et d'eau gommée se conduit précisément d'une manière inverse. La cause de ce double phénomène est évidente : la ligne suivant laquelle le contact des particules est le plus intime est, dans chacun des deux cas, perpendiculaire à la surface des plaques, conséquence de la pression que les particules ont supportée dans cette direction; et cette ligne perpendiculaire prend une position équatoriale ou axiale, suivant que la sub-

stance de la plaque est diamagnétique ou magnétique. Ce qu'on obtient ici artificiellement doit avoir lieu naturellement dans les cas tels que ceux que présentent les cristaux où la masse n'est pas parfaitement homogène, et où, par conséquent, il existe une certaine direction suivant laquelle l'action des forces s'exerce d'une manière plus favorable que dans d'autres. Cette direction peut être appelée *ligne de polarité élective;* elle est axiale dans les corps magnétiques, équatoriale dans les diamagnétiques.

Ce n'est pas tant au fond la direction des axes que celle des plans de clivage qui influe sur la position que prend le cristal entre les pôles de l'électro-aimant; position qui doit être telle que les plans de clivage prennent la direction équatoriale dans les substances diamagnétiques, et la direction axiale dans les magnétiques. Dans les exemples que nous avons déjà cités, tels que le sulfate de zinc qui est diamagnétique, et le sulfate de nickel qui est magnétique, l'influence des plans de clivage se confond avec celle des axes, vu que la position de ces plans est dans chacun des cristaux la même, c'est-à-dire axiale par rapport à l'axe. Mais il y a d'autres cas dans lesquels cette position n'étant plus la même, on peut constater que c'est la direction du plan qui est la cause influente. Deux cubes de même dimension, l'un de béryl, l'autre taillé dans un prisme de scapolithe, cristaux tous deux magnétiques, se dirigent, le premier de façon que son axe soit situé équatorialement, le second de façon qu'il soit situé axialement : cela vient de ce que les plans de clivage sont perpendiculaires à l'axe dans le béryl, tandis qu'ils lui sont parallèles dans la scapolithe; on voit que dans les deux cas également, les plans de clivage se dirigent axialement comme avec le sulfate de nickel. D'autre part, deux cubes, l'un de salpêtre, l'autre de topaze, cristaux tous deux diamagnétiques, se placent, le premier avec son axe dirigé équatorialement, le second avec son axe dirigé axialement; ce qui tient à ce que les plans de clivage sont parallèles à l'axe dans le salpêtre et perpendiculaires à l'axe dans la topaze : mais il en résulte que dans les deux cas également, les plans de clivage sont dirigés équatorialement comme avec le sulfate de zinc et le sulfate de

magnésie. On peut assez bien se rendre compte de cette influence des plans de clivage en se rappelant que les cristaux peuvent être considérés comme formés de couches moléculaires très-minces, juxtaposées et adhérentes par l'effet de la cohésion, sans cependant être en contact absolu les unes avec les autres. Les espaces vides qu'on suppose, dans la théorie corpusculaire, séparer les particules les unes des autres, se trouvent dans les cristaux séparer les couches parallèles dont l'ensemble constitue le cristal. Dès lors rien n'est plus naturel que les couches prennent une direction axiale, si elles sont magnétiques, et une direction équatoriale, si elles sont diamagnétiques. Il est même facile de prouver directement par l'expérience qu'il en doit être ainsi en imitant artificiellement cette structure des cristaux.

On découpe, dans une feuille de papier à décaper, soit d'émeri, plusieurs bandes d'un pouce de longueur et d'un quart de pouce de largeur; on les superpose les unes aux autres, en les faisant adhérer, au moyen de la gomme, de manière à former un parallélipipède, qui représente un cristal magnétique dans lequel les plans de clivage sont parallèles à l'axe : la couche d'émeri représente la lame cristalline magnétique, et le papier l'espace vide qui sépare les lames contiguës. Ce parallélipipède prend immédiatement entre les pôles la direction axiale. Mais si l'on forme un second parallélipipède, également d'un pouce de longueur, par la juxta-position de bandes carrées, dont la surface est égale à celle d'une section transversale du premier, on a le modèle d'un cristal magnétique comme le premier, mais dont les plans de clivage sont perpendiculaires à l'axe; aussi, quoique sa longueur soit quadruple de sa largeur, se place-t-il immédiatement dans la position équatoriale comme s'il était repoussé par les deux pôles, mais de façon que les couches dont il est formé soient dirigées axialement. Les couches sont dans les deux cas verticales; seulement, dans le premier cas, elles sont parallèles à la plus grande longueur, et dans le second elles lui sont perpendiculaires : ces deux modèles représentent, le premier la scapolithe, le second le béryl. En recouvrant le papier d'une couche de bismuth, à la place de la couche d'émeri,

on peut construire également deux modèles, dont le premier se conduit comme le nitre, et le second comme le topaze.

M. Rieu, qui s'est beaucoup occupé des propriétés magnétiques et diamagnétiques des corps dans leur rapport avec leur constitution moléculaire, avait déjà obtenu des résultats analogues à ceux de MM. Tyndall et Knoblauch. Voici, en particulier, deux expériences remarquables de cet ingénieux observateur. La première consiste à construire un prisme à base rectangulaire par la juxta-position de rectangles égaux découpés dans une feuille de carton mince, disposés verticalement dans une direction parallèle à la longueur du prisme, et serrés fortement les uns contre les autres à l'aide d'étroits rubans de soie. Ce prisme, suspendu délicatement au moyen d'un fil de soie sans torsion, se dirige dans le méridien magnétique comme une aiguille aimantée ; il a 3 centimètres de hauteur, 13 à 14 de longueur, et 7 de largeur. La seconde expérience est faite au moyen d'un prisme exactement semblable au précédent pour les dimensions, mais construit de manière que les rectangles de carton, toujours disposés verticalement, soient perpendiculaires à la longueur de la base; ce prisme, suspendu de la même manière, se dirige de façon que sa plus grande largeur soit perpendiculaire et non parallèle au méridien magnétique, et que par conséquent, dans cette seconde expérience comme dans la première, les plans des couches de carton soient dirigées du sud au nord. L'effet observé est évidemment dû à l'aimantation opérée par le magnétisme du globe terrestre sur les couches de carton, substance qui est magnétique à cause de la petite quantité de fer qu'elle prend dans son mode de fabrication, ce que démontre du reste l'action qu'exerce sur elle l'électro-aimant. Mais il est bien remarquable que la disposition imaginée par M. Rieu puisse rendre sensible l'action directrice du globe terrestre sur un corps doué d'un magnétisme si faible, et c'est une preuve de plus à ajouter à celles de MM. Tyndall et Knoblauch, en faveur de l'explication qu'ils donnent des propriétés magnétiques et diamagnétiques des cristaux.

Lorsque les cristaux présentent plusieurs plans de clivage, on doit substituer à la notion de lames minces, celle de petits

prismes, même de petits cubes, s'il y a trois plans perpendiculaires. Dans ce dernier cas, qui est celui que présente entre autres le sel gemme, la force directrice est nulle, les clivages s'annulant les uns les autres. Le quartz, comme le verre ordinaire, ne possède qu'une puissance directrice à peine sensible; ce qui tient à ce qu'il n'existe chez l'un et chez l'autre que des traces de clivage. Si au lieu de présenter des plans de clivage, un cristal a une structure fibreuse, sa force agit dans le sens des fibres. En un mot, tout ce qui affecte la structure moléculaire doit affecter d'une manière correspondante la ligne de polarité élective. Si la structure disparaît, sa puissance directrice disparaît aussi, comme cela a lieu suivant l'observation de Faraday, quand on élève jusqu'au point de fusion la température des cristaux de bismuth et d'antimoine.

Enfin, pour montrer que la propriété de l'axe optique ne tient point à sa qualité d'axe, mais à ce qu'il représente la direction suivant laquelle les particules sont le plus rapprochées les unes des autres, on choisit un cristal de spath calcaire bien pur, on le réduit en une poudre fine qu'on dissout dans de l'acide muriatique; puis avec le carbonate d'ammoniaque, on obtient un précipité qui a exactement la même composition chimique que le cristal. Au moyen d'eau gommée, on lie les particules du précipité et on lui donne la forme qu'avait primitivement le cristal, en ayant soin de comprimer fortement la masse, de façon que sa ligne de plus grande compression coïncide avec la direction qu'avait l'axe optique dans le cristal lui-même. Cette masse ainsi arrangée se comporte exactement, sous l'action de l'aimant, comme se comportait le cristal avant d'avoir été réduit en poudre; il n'est pourtant pas possible que la force émanée de l'axe optique ait pu survivre à la trituration, à la dissolution et à la précipitation qu'a successivement éprouvées le spath calcaire.

Ainsi nous devons considérer les propriétés spéciales que présentent les cristaux, quant à l'action que les aimants exercent sur eux, non comme une exception aux lois générales du magnétisme et du diamagnétisme, mais comme une conséquence du mode particulier de groupement de leurs particules,

qui est également la cause de l'inégale dilatibilité, et de l'inégale conductibilité pour la chaleur et pour l'électricité, suivant différentes directions, que présentent les substances cristallines; et auquel est due probablement aussi, par l'influence qui en résulte sur l'état de l'éther dans leur intérieur, l'action particulière qu'elles exercent sur la lumière.

De nouvelles recherches de M. Tyndall ont encore confirmé les résultats généraux que nous venons de rapporter. En plaçant les substances soumises à l'action de l'électro-aimant aux extrémités d'un levier horizontal délicatement suspendu, ce physicien a pu étudier l'action répulsive ou attractive des pôles magnétiques sur des cristaux dont l'axe était tantôt parallèle, tantôt perpendiculaire à la ligne axiale de l'électro-aimant. Il a constamment trouvé que la répulsion comme l'attraction étaient plus fortes dans le premier cas que dans le second; ainsi avec un cube de bismuth la répulsion, quand le plan principal de clivage est parallèle à l'axe, est à la répulsion, quand ce plan est perpendiculaire à l'axe, dans le rapport de 15 à 11 environ. M. Tyndall a encore réussi à imprimer aux substances solides, par une forte pression, sans avoir besoin de les réduire en poudre, un état moléculaire qui les fait placer entre les pôles de l'électro-aimant dans une direction dépendante du sens de la pression qui a été exercée sur elles.

M. Matteucci a obtenu les mêmes effets de la compression aussi bien sur le soufre et sur l'acide stéarique que sur le bismuth. Les pièces soumises à la compression étaient placées entre les deux mâchoires en verre d'une pince, de façon que tous les points de leurs deux surfaces fussent également comprimés; elles étaient ensuite lavées dans l'acide hydrochlorique pour les dépouiller de toute impureté; on leur avait donné la forme de cubes; et ces cubes, suspendus de façon que la ligne de compression fût horizontale, se dirigeaient constamment entre les pôles de l'électro-aimant, de manière que cette ligne fût perpendiculaire à la ligne polaire. En découpant dans un cube de 10^{mm} de côté qui a été fortement comprimé, des aiguilles prismatiques dans des sens différents, on les voit se diriger équatorialement et axialement suivant que la ligne de compres-

sion est parallèle ou perpendiculaire à leur axe, ce qui dépend de la manière dont elles ont été découpées. Si c'est sur des masses de bismuth cristallisé que les aiguilles prismatiques sont découpées, on observe des différences très-prononcées entre elles, suivant que leurs faces de clivage, toujours parallèles à leur longueur, sont horizontales ou verticales. Ainsi, trois aiguilles de même longueur (18^{mm} 1/2), mais de poids différents depuis 1^{gr}, 120 jusqu'à 8^{gr}, 150, suspendues entre des surfaces polaires éloignées de 35^{mm} ont toujours fait le même nombre d'oscillations dans un temps sensiblement plus court quand les faces de clivage étaient verticales que quand elles étaient horizontales; celle de 8^{gr}, 150 faisait 20 oscillations en 52" dans le premier cas et en 136" dans le second. Si les extrémités polaires sont allongées en pointe, les différences sont moindres. Lorsque les plans de clivage sont perpendiculaires à l'axe, l'aiguille se dirige axialement entre les pôles, à moins que les extrémités polaires n'en soient très-rapprochées, dans lequel cas elle est repoussée vers la ligne équatoriale.

M. Matteucci a réussi à imiter tous les effets du bismuth cristallisé en formant des cubes et des aiguilles, au moyen de petites lames très-minces de bismuth obtenues en faisant tomber d'une certaine hauteur sur un plan de marbre du bismuth liquide à petites gouttes; c'est une preuve de plus que les plans de clivage fonctionnent comme des lames séparées. Toutefois, M. Matteucci croit difficile d'expliquer tous les phénomènes magnéto-cristallins par la théorie de MM. Tyndall et Knoblauch; il ne voit pas à quoi tiendrait dans cette théorie la différence très-grande de la force répulsive qui fait osciller une aiguille de bismuth dont les plans de clivage sont parallèles à son axe, suivant que ces plans sont verticaux ou horizontaux. Il trouve également peu conciliable avec cette théorie l'expérience suivante dans laquelle, ayant suspendu entre les pôles de l'électro-aimant une aiguille de sulfate de chaux aux extrémités de laquelle sont fixés deux cubes de bismuth, il vit l'aiguille être toujours repoussée dans la ligne équatoriale quand les faces de clivage étaient ou horizontales ou parallèles à sa longueur, et au contraire se précipiter sur la ligne des pôles, quand les faces

de clivage étaient perpendiculaires à la longueur de l'aiguille. Les faces polaires dans ce cas étaient carrées et distantes de 30 millim. Cette expérience ne nous paraît pas, autant qu'à M. Matteucci, contraire aux idées théoriques de M. Tyndall; en effet les deux cubes de bismuth, quand l'aiguille de sulfate de chaux se place axialement, ont leurs plans de clivage perpendiculaires à cette ligne comme cela doit être; il est vrai qu'ils semblent être attirés par les pôles magnétiques, tandis que le bismuth naturellement diamagnétique, doit en être repoussé; mais si l'aiguille qui porte les deux cubes se plaçait équatorialement, alors les plans de clivage seraient parallèles à la ligne axiale, ce qui serait contraire à la théorie. Il y a donc là opposition entre deux tendances contraires, et si c'est l'influence du plan de clivage qui l'emporte, cela tient à la grandeur du champ magnétique, due elle-même à l'étendue des surfaces polaires et à leur distance.

Quant à l'influence qu'exerce sur la puissance diamagnétique d'un cristal de bismuth la disposition horizontale ou verticale de ses plans de clivage, elle tient très-probablement à un effet d'induction. M. Matteucci a effectivement fait la remarque très-curieuse que de deux cubes parfaitement égaux de bismuth cristallisé soumis à l'action d'un électro-aimant tournant, celui dont les plans de clivage sont verticaux et perpendiculaires aux plans des courants de l'électro-aimant est entraîné avec beaucoup plus de force que celui dont les plans de clivage sont horizontaux; en tout cas, les masses de bismuth amorphes éprouvent une action plus considérable que celles qui sont cristallisées. La différence est encore plus sensible quand au lieu de cubes de bismuth cristallisé, on prend deux cubes formés de lames de cuivre très-minces, isolées entre elles par une couche de vernis. Celui des cubes dont les lames sont verticales prend un mouvement très-rapide de rotation sous l'influence d'un électro-aimant tournant au-dessus duquel il est suspendu, tandis que celui dont les lames sont horizontales ne ressent pas l'action de l'électro-aimant. Il paraît que dans la première disposition, les courants induits peuvent se développer librement et circuler dans chaque lame, ce qui n'a pas lieu dans le second mode d'arrangement, où les courants

induits n'ont pas pour achever leur circuit un conducteur en dehors de l'influence inductrice.

Les expériences de M. Matteucci montrent, comme Faraday l'avait déjà remarqué, la part importante que l'induction peut avoir quand on étudie l'action de l'aimant sur les corps conducteurs. Ce rôle peut même se manifester dans des cas où, d'avance, on ne l'aurait pas cru possible. En voici des exemples curieux que nous devons encore à M. Matteucci. Ayant obtenu du cuivre, de l'argent et du bismuth à un état de division extrême, en décomposant avec le courant d'une pile très-forte des solutions très-pures de ces métaux, il s'assura d'abord, en plaçant ces poudres métalliques dans des tuyaux de paille ou de plume, qu'elles étaient très-fortement diamagnétiques; puis il en fit des mélanges homogènes en les mêlant rapidement avec de la colophane fondue. Ces mélanges étaient diamagnétiques et parfaitement isolants, ainsi qu'on pouvait s'en assurer en les mettant avec un galvanomètre sensible dans le circuit d'une forte pile. Cependant, des sphères de 12 millimètres de diamètre, formées de ces mélanges de résine et de poudres métalliques, suspendues par un fil de cocon à une très-petite hauteur au-dessus des pôles d'un électro-aimant mis en rotation, tournaient dans le même sens que cet électro-aimant en accomplissant ainsi plusieurs révolutions. Cet effet ne pouvait être dû au diamagnétisme des mélanges, puisque le phosphore et l'acide stéarique, qui ont un pouvoir diamagnétique beaucoup plus fort, n'acquièrent pas sous l'action du même électro-aimant le magnétisme de rotation. D'un autre côté, il était difficile d'attribuer cette rotation à des courants induits semblables à ceux qui sont développés dans des masses métalliques continues, car les particules dont ces poudres sont composées ont moins de $\frac{1}{100}$ de millimètre de diamètre. Cependant c'est bien dans l'induction qu'il faut chercher l'explication de ces phénomènes; et la preuve, c'est que les mélanges formés avec les poudres d'argent et de cuivre les manifestent avec plus d'intensité que ceux qui contiennent le bismuth divisé, métal moins bon conducteur; les poudres faites avec les oxydes de ces mêmes métaux, qui ne sont pas conducteurs, ne produisent

aucun effet. Il est donc probable qu'il s'opère dans les particules une induction moléculaire, qui donne naissance à un courant moléculaire quand la particule est isolée, et à un courant induit fini quand plusieurs particules sont agglomérées de manière à former une masse continue. Nous trouverions donc là une confirmation remarquable de la théorie de l'induction que nous avons donnée dans le chapitre V, p. 445.

Il résulte de ce que nous venons de voir que, si la structure et surtout l'état cristallin modifient d'une manière remarquable les propriétés magnétiques et diamagnétiques des corps, leur état de division plus ou moins grand n'exerce, à cet égard, aucune influence. Il n'en est pas de même de la température, qui diminue notablement les propriétés diamagnétiques de certaines substances, et en particulier du bismuth. Cependant quand le bismuth est cristallisé, son pouvoir magnéto-électrique, qu'il doit à son état cristallin, ne disparaît qu'au moment de sa fusion, ainsi que Plucker et Faraday l'avaient déjà remarqué. Une expérience élégante de M. Matteucci montre qu'il en est de même du pouvoir diamagnétique du bismuth amorphe. Une petite cuiller en chaux caustique, sur la surface de laquelle on a passé un papier teint de colcothar pour la rendre légèrement magnétique, est fixée à l'extrémité d'une mince tige de bois suspendue horizontalement entre les pôles d'un électro-aimant et est attirée par eux. On la remplit de bismuth pur, et aussitôt elle est vivement repoussée. En chauffant la cuiller avec une lampe à alcool, on la voit s'attacher au pôle de l'aimant et s'y fixer dès que le bismuth est fondu; mais au moment où, par l'effet du refroidissement, une petite croûte solide apparaît sur la surface du bismuth, la répulsion recommence immédiatement. Cependant les expériences de Plucker démontrent que la fusion, quoique diminuant notablement le diamagnétisme du bismuth, ne le fait pas complétement disparaître, et il est probable que, dans la manière d'opérer de M. Matteucci, il est trop faible pour pouvoir être sensible; peut-être du reste ne se manifeste-t-il que par un changement de forme déterminé dans le bismuth liquide que contient la cuiller de chaux, ainsi que cela a lieu dans les expé-

riences sur le diamagnétisme des liquides, que nous avons rapportées dans le § 3. M. Matteucci s'est encore assuré, au moyen de ce même appareil, en plaçant un globule de fer dans la cuiller de chaux, que le fer fondu était encore attiré par l'aimant; sa force magnétique ne serait que les 15 millioniêmes de ce qu'elle est quand le cristal est solide à la température ordinaire.

Nous nous sommes beaucoup occupés, dans ce §, de l'influence de l'état moléculaire, soit physique des corps, sur les phénomènes magnétiques ou diamagnétiques qu'ils présentent. Nous devrions aussi étudier l'influence de leur composition chimique, mais cette étude ne nous conduirait qu'à des faits isolés, où aucune loi ne saurait jusqu'à présent être découverte.

Il semble cependant que la puissance magnétique si considérable de l'oxygène devrait exercer une influence importante dans les composés où entre cet élément. Il en est ainsi dans quelques cas et non dans d'autres. L'oxyde de cuivre est magnétique; le bioxyde d'argent, qu'on obtient avec la pile, au pôle positif, en décomposant le nitrate d'argent, l'est aussi; l'acide antimonique, également; tandis que l'acide antimonieux, l'oxyde d'argent et l'oxydule de cuivre sont diamagnétiques. Ces résultats qu'a obtenus M. Matteucci sembleraient démontrer l'influence de la proportion plus ou moins grande d'oxygène. D'un autre côté, du cuivre fortement chauffé dans du chlore est magnétique, tandis que le cyanure jaune de fer est diamagnétique, soit à l'état cristallin, soit en poudre, après avoir perdu son eau de cristallisation. Ces deux derniers exemples semblent prouver d'une manière bien forte l'indépendance possible du pouvoir magnétique ou diamagnétique d'une combinaison de celui de ses éléments.

§ 5. Action sur la lumière polarisée des corps transparents soumis à l'influence magnétique.

Nous arrivons ici à la découverte importante par laquelle Faraday a préludé à ses recherches sur le diamagnétisme, qui en sont assez indépendantes pour que nous ayons pu, sans in-

convénient, les exposer les premières, ainsi que nous y portait l'enchaînement naturel des faits.

On sait qu'un rayon de lumière peut être polarisé de plusieurs manières, ou par réflexion, sous un certain angle qui varie selon la nature de la surface réfléchissante; ou par son passage à travers une suite de lames transparentes; ou encore en étant transmis à travers un cristal doué de la double réfraction. Dans ce dernier cas, on a deux rayons polarisés au lieu d'un; le rayon qui a éprouvé la réfraction ordinaire est polarisé, comme il l'aurait été par une surface de verre réfléchissante dont le plan d'incidence serait *parallèle* à la section principale du cristal, et le rayon qui a éprouvé la réfraction extraordinaire, comme il l'aurait été par cette même surface réfléchissante, mais avec un plan d'incidence *perpendiculaire* à la section principale du cristal. Dans les expériences dont nous allons parler, on s'est servi pour plus de commodité de ce dernier mode pour polariser la lumière; mais au lieu d'employer un cristal quelconque de spath calcaire, on choisit un rhomboïde de deux centimètres et demi de longueur sur dix millimètres de largeur et d'épaisseur environ, qu'on coupe en deux parties par un plan passant par les diagonales parallèles de deux des longues faces, et dont on réunit ensuite les deux fragments par du baume de Canada dans la position qu'ils avaient d'abord. On fait passer le rayon à travers ce rhomboïde, ainsi préparé dans le sens de sa longueur, et au lieu d'avoir deux rayons émergents, on n'en a qu'un, celui qui éprouve la réfraction extraordinaire; l'autre, l'ordinaire, en rencontrant la couche de baume de Canada, se trouve, par l'effet du grand pouvoir réfringent de cette substance, réfléchi intérieurement, et ne peut par conséquent sortir du rhomboïde; cette différence entre le sort des deux rayons résulte de ce que l'ordinaire ayant dans le spath calcaire un indice de réfraction plus grand que l'extraordinaire, il éprouve plus facilement la réfraction totale. Un prisme de Nicol, c'est ainsi qu'on nomme, du nom de son inventeur, le rhomboïde de spath calcaire arrangé comme nous venons de l'indiquer, présente un moyen très-commode d'avoir un rayon de lumière polarisé. Lorsqu'on reçoit le rayon qui en sort sur

un second prisme semblable, de manière qu'il le traverse aussi dans le sens de sa longueur, on observe, conformément aux lois de la polarisation, les phénomènes suivants. Si les plans des sections principales des deux prismes sont parallèles, le rayon ressort du second prisme avec toute son intensité primitive; si les deux plans sont perpendiculaires, le rayon est complétement éteint. On peut obtenir le même résultat en employant, au lieu de deux prismes de Nicol, deux tourmalines taillées, l'une parallèlement, l'autre perpendiculairement à l'axe optique; car elles ont alors la singulière propriété d'absorber, l'une le rayon ordinaire, l'autre le rayon extraordinaire; de sorte que chacune ne laisse sortir qu'un rayon au lieu de deux, quoique douées de la double réfraction. Aussi, quand on les combine de façon que les plans de leur section principale soient parallèles, le rayon qui a traversé la première est éteint par son passage à travers la seconde; mais si les deux plans sont perpendiculaires, il y a transmission de la lumière. La combinaison des deux tourmalines, comme celle des deux prismes de Nicol, présente donc le phénomène d'une obscurité totale produite par la superposition, suivant un certain mode, de deux corps transparents. Mais on préfère généralement, pour ce genre d'observations, l'emploi des deux prismes de Nicol à celui des deux tourmalines, à cause de leur plus grande transparence, car les tourmalines sont toujours plus ou moins colorées, et par conséquent moins translucides que les cristaux de spath calcaire. On nomme *analyseur* le prisme ou le cristal quelconque sur lequel on reçoit la lumière polarisée, et qui sert à déterminer si, en effet, cette lumière est polarisée, dans quelle proportion elle est polarisée si elle ne l'est pas totalement, et quelle est enfin la direction de son plan de polarisation. On nomme *polariseur* le prisme ou le cristal qui a polarisé la lumière en la transmettant.

Je suppose maintenant qu'on ait deux prismes de Nicol, placés à une certaine distance l'un de l'autre, sur une même ligne horizontale, et qu'on regarde à travers ces deux prismes la lumière des nuées, ou mieux encore celle d'une lampe : on peut, d'après ce que nous venons de voir, en tournant le prisme

contre lequel l'œil est appliqué, c'est-à-dire le prisme analyseur, lui donner une position telle, que la lumière soit complétement éteinte. Si l'on place entre les deux prismes de Nicol une pièce de verre longue de 4 à 5 centimètres, et large et épaisse de 1 centimètre environ, disposée de façon que le rayon polarisé la traverse dans le sens de sa longueur, rien n'est changé au résultat de l'expérience ; mais si ce prisme de verre interposé se trouve placé sur la ligne axiale qui joint les deux pôles d'un électro-aimant, et de façon que ces deux pôles soient très-rapprochés de ses extrémités, tout en laissant passer le rayon de lumière au-dessus d'eux, alors le phénomène est tout à fait modifié. Je suppose les prismes de Nicol disposés de façon que le rayon polarisé soit éteint ; par le seul fait que l'électro-aimant est aimanté, la lumière reparaît ; elle disparaît de nouveau au moment où le courant électrique cesse de circuler autour de l'électro-aimant. Quand le rayon reparaît sous l'influence magnétique, il suffit, pour le faire disparaître de nouveau, de tourner l'un des prismes, par exemple l'analyseur, d'un certain angle, à gauche ou à droite, selon que c'est le pôle nord ou le pôle sud de l'électro-aimant, qui est d'un côté ou de l'autre. Mais si dans cette nouvelle position du prisme de Nicol, on fait cesser l'état magnétique de l'électro-aimant, sans rien changer du reste à la disposition de toutes les parties de l'appareil, le rayon se montre de nouveau.

Cette expérience met en évidence ce fait important, c'est que le passage d'un rayon polarisé à travers un prisme de verre interposé entre des pôles magnétiques contraires change son plan de polarisation, et fait tourner ce plan d'un certain angle qu'on détermine en mesurant l'angle dont il faut tourner le prisme analyseur pour éteindre de nouveau le rayon, c'est-à-dire pour ramener de nouveau les deux plans de polarisation à être perpendiculaires l'un à l'autre. Pour mesurer cet angle, on fixe le prisme analyseur dans une pièce métallique qui est placée au centre d'un cercle divisé, et qui est mobile sur son axe. Une aiguille fixée à la pièce, et dont la pointe peut parcourir successivement tous les degrés de la division, sert à mesurer de combien de degrés on a tourné le prisme.

La substance dans laquelle M. Faraday a reconnu pour la première fois cette propriété remarquable, est le même verre pesant (boro-silicate de plomb) qu'il a reconnu aussi être éminemment diamagnétique. Nous verrons dans l'instant que la plupart des corps transparents présentent la même propriété, toutefois à des degrés différents et moindres que le verre pesant. Mais il nous faut auparavant étudier d'un peu plus près et dans ses détails, le curieux phénomène que nous venons de décrire.

Avant la découverte de Faraday, on connaissait déjà quelques substances qui, sans le secours de la force magnétique, en vertu de leur propre constitution moléculaire, possèdent la faculté, quand elles sont interposées sur la route d'un rayon polarisé, de faire tourner d'un certain angle le plan de polarisation; cette propriété était désignée sous le nom de *polarisation circulaire*. Dans le nombre de ces substances, une seule est solide; c'est une plaque de cristal de roche taillée perpendiculairement à son axe optique. Mais on a remarqué que, suivant le cristal particulier d'où proviennent les plaques, elles font tourner le plan de polarisation de droite à gauche ou de gauche à droite. Cette circonstance dénote évidemment des différences de structure entre les divers échantillons de cristal de roche; et en effet ces différences avaient déjà été signalées par Haüy; elles tiennent à ce que les cristaux de quartz portent des faces trapéziennes placées sur les angles compris entre les faces du prisme et les faces de la pyramide, et à ce que ces faces, nommées *plagièdres* par Haüy, ne sont jamais que d'un côté, à droite pour certains cristaux, à gauche pour d'autres. La polarisation circulaire indique cette différence, et permet de reconnaître à quel genre de cristaux appartiennent des plaques de quartz taillées; mais ce qui est assez remarquable, c'est que le quartz est un exemple de plus à ajouter à ceux que présentent la tourmaline et la boracite qui, comme nous le verrons, ont une électricité différente à leurs deux extrémités, en preuve que la dissymétrie dans les cristaux est toujours accompagnée d'une propriété physique particulière. Du reste, les plaques provenant du même cristal de quartz font tourner le plan de pola-

risation dans le même sens et d'une quantité proportionnelle à leur épaisseur, et quand plusieurs plaques sont superposées, l'effet total est égal à la somme des effets produits par chacune, ou à la différence des sommes des effets semblables, si toutes les plaques n'agissent pas dans le même sens. Enfin, quand les faisceaux polarisés sont d'une lumière homogène et non de lumière blanche, la déviation du plan de polarisation est d'autant plus grande que la lumière polarisée est d'une nature plus réfrangible. Pour donner une idée de la différence considérable qui existe à cet égard entre les différentes espèces de lumière, nous citerons une expérience de M. Biot, qui a trouvé, avec une plaque de cristal de roche de 1 millimètre d'épaisseur, que les déviations du plan de polarisation sont : pour le rouge extrême (le moins réfrangible), 17° 29′ 47″; pour le rayon limite du jaune et du vert (réfrangibilité moyenne), 25° 40′ 3″; pour le rayon violet extrême (le plus réfrangible), 44° 4′ 58″.

Il résulte de cette dernière propriété que lorsque la lumière polarisée est de la lumière blanche, elle ne peut jamais être complétement éteinte, puisque l'angle dont il faut tourner le prisme analyseur pour trouver le plan de polarisation du rayon rouge, par exemple, est différent de celui qui donnera le plan de polarisation d'un autre rayon. Aussi, au lieu d'alternatives de lumière et d'obscurité, on obtient, en se servant de lumière blanche, une série de teintes colorées. Les teintes sont composées du mélange de tous les rayons pour lesquels l'angle dont on a tourné l'appareil n'est pas celui dont leur plan de polarisation a été dévié par le passage de la lumière à travers la lame cristalline. Ainsi, avec un angle de 18° environ, qui est celui de la déviation des plans de polarisation, dans le cas d'une plaque de cristal de roche de 1 millimètre d'épaisseur pour le rayon *rouge*, ce rayon seul est éteint, et on a une teinte complémentaire du rouge provenant du mélange de tous les autres rayons. Avec un angle de 40° environ, c'est le rayon violet qui est éteint, et on a une teinte complémentaire du violet. Quand le prisme analyseur qu'on emploie n'est pas un prisme de Nicol, mais un simple prisme de spath calcaire, on a deux images au lieu d'une, et ces deux images provenant de rayons dont

les plans de polarisation sont perpendiculaires l'un à l'autre, puisque l'une est l'image ordinaire, et l'autre l'image extraordinaire, se trouvent, par l'interposition de la lame de cristal de roche, avoir leurs plans de polarisation également déviés, mais toujours dans des positions rectangulaires, l'une relativement à l'autre; de sorte que leurs teintes sont complémentaires; ce dont il est facile de s'assurer en remarquant que partout où les deux images empiètent l'une sur l'autre, on a une tache parfaitement blanche. M. Biot a pu même calculer d'avance la teinte de chaque image en déterminant ainsi les rayons qui doivent la composer, et le calcul s'est trouvé parfaitement d'accord avec l'expérience. Parmi ces teintes, il en est une qu'il a nommée teinte de passage, parce qu'elle ne dure qu'un instant, quand on en obtient une succession en faisant tourner le prisme analyseur, et il l'a adoptée pour déterminer la déviation du plan de polarisation dans chaque cas particulier; elle a l'avantage d'être très-nette et de ne correspondre qu'à un seul angle bien défini, ce qui n'est pas le cas pour les autres teintes qui sont plus vagues. Elle est donnée par le rayon extraordinaire, par conséquent on l'obtient également avec le prisme analyseur de Nicol, qui ne laisse sortir que ce rayon. Cette teinte est un violet bleuâtre, qui suit immédiatement le bleu intense, et précède immédiatement le rouge jaunâtre dans la marche progressive de la rotation. Tant par sa nature spéciale que par son opposition tranchée avec les deux autres, entre lesquelles elle est toujours comprise, il est impossible de ne pas la reconnaître avec une parfaite évidence, quand on l'a seulement cherchée une fois. On peut, en multipliant la déviation obtenue pour cette teinte par $\frac{23}{30}$, la ramener à celle des rayons rouges, qui est ordinairement la teinte à laquelle on rapporte les divers pouvoirs rotatoires.

Cette dernière observation nous conduit à ajouter que M. Biot a reconnu que, si le quartz est la seule substance solide qui présente les phénomènes de la polarisation circulaire, il existe un grand nombre de corps liquides qui possèdent la même propriété; telles sont, entre autres, les huiles essentielles de térébenthine, l'huile essentielle de citron, le sirop de sucre con-

centré, l'acide tartrique, la dextrine, substance qu'on tire de l'amidon, et qui a reçu son nom de la propriété même dont nous nous occupons, pour indiquer qu'elle fait tourner le plan de polarisation de gauche à droite.

A la suite de l'étude approfondie qu'il a faite du pouvoir rotatoire des liquides, c'est-à-dire du pouvoir qu'ils ont de dévier les plans de polarisation des rayons lumineux proportionnellement à leur épaisseur, M. Biot a établi que cet effet résulte d'une action propre exercée individuellement par les groupes moléculaires qui se rencontrent sur le trajet du rayon transmis, action égale pour tous les groupes si le rayon est homogène, et produisant ainsi des déviations successives égales, parce que le plan de polarisation de chaque rayon simple se montre également susceptible de déviation, après avoir été déjà dévié. Alors la déviation angulaire totale éprouvée par ce plan à travers une épaisseur mesurable du liquide actif est la somme des déviations infiniment petites opérées par les groupes moléculaires que le rayon a rencontrés dans son trajet. On peut, en dégageant cette somme de ce qui tient aux différences de réfrangibilité, de densité, de longueur, de manière à la ramener à des éléments toujours comparables, en déduire une valeur angulaire proportionnelle à la déviation infiniment petite que produirait un seul groupe moléculaire constituant du liquide agissant dans un état physique constant sur un même rayon ; cette valeur ainsi obtenue est ce que M. Biot a appelé *le pouvoir rotatoire moléculaire des corps*.

Le pouvoir rotatoire moléculaire ne change nullement sous les influences qui modifient les distances mutuelles des groupes moléculaires sans altérer leur constitution. Ainsi des dissolutions dans l'eau ou dans l'alcool de sucre, de gomme, de camphre, ont chacune un pouvoir rotatoire moléculaire qui reste le même, quelque étendue que soit la dissolution, quoique leur action absolue, si l'épaisseur de la couche est restée la même, dépende de leur degré de concentration. De même encore des huiles essentielles qui possèdent ce pouvoir, celles mêmes qui l'exercent en sens contraires, peuvent être mêlées dans toutes proportions entre elles ou avec d'autres qui ne le possèdent pas,

et la somme des pouvoirs propres des particules actives donne toujours le pouvoir du mélange. Mais lorsque les groupes moléculaires actifs éprouvent un changement de constitution ou de composition chimique, leur pouvoir change notablement. Il y a même des modifications dans la nature intime des corps que l'analyse chimique est impuissante à découvrir et que manifeste le changement du pouvoir rotatoire moléculaire. M. Biot a réussi à faire de cette propriété un réactif chimique des plus sensibles; il est fâcheux seulement qu'il ne puisse s'appliquer qu'à un chiffre très-restreint de substances.

Enfin une considération générale qui démontre que l'action exercée ainsi sur la lumière est moléculaire, c'est l'impossibilité qu'il y a qu'un rayon de lumière qui pénètre perpendiculairement un liquide ou un gaz homogène puisse éprouver un changement quelconque par une action de masse. En effet toutes les actions de masse que le milieu peut exercer sur le rayon produisent des résultantes symétriques autour de la normale d'incidence; elles ne peuvent donc imprimer à ce rayon une dissymétrie autour de cette normale. C'est cependant ce qui a lieu lorsque le milieu fait dévier le plan de polarisation à droite ou à gauche du plan primitif, mais toujours dans un sens fixe pour le même rayon et pour le même état des particules matérielles, quels que soient les rapports de position ou de distance qu'on établisse entre elles en les agitant ou en les mêlant avec d'autres qui ne fassent que les séparer sans les modifier chimiquement et sans avoir elles-mêmes de pouvoir rotatoire. Un tel effet croissant d'une manière continue et uniforme avec le nombre des groupes moléculaires que le rayon traverse exige donc que chacun d'eux produise sa part proportionnelle, quoique infiniment petite, dans la déviation totale qui s'observe à travers une épaisseur finie et qu'il la produise toujours la même dans toutes les positions sous lesquelles il peut s'offrir au rayon. Alors la dissymétrie ainsi opérée se conçoit aisément, tandis qu'elle serait incompréhensible comme action de masse, ou pour mieux dire, elle serait mécaniquement impossible.

Sans nous arrêter plus longtemps sur les phénomènes que

nous venons de décrire, nous nous bornerons à remarquer que le pouvoir rotatoire des liquides est incomparablement plus faible que celui du quartz, car le plus efficace de ces liquides, le sirop de sucre concentré, l'est cependant trente ou quarante fois moins que le quartz. Ainsi pour une épaisseur de un millimètre, ce sirop n'imprime au rouge extrême qu'une rotation d'environ 30′, tandis qu'elle est de 17° 30′ avec le quartz. Aussi pour comparer les pouvoirs rotatoires des différents liquides, on les place successivement dans des tubes plus ou moins longs, fermés avec soin par des obturateurs faits d'un verre bien blanc et bien plan, et on augmente ainsi par l'épaisseur de la couche liquide que le rayon polarisé est appelé à traverser, l'effet total de déviation du plan de polarisation. Quand il s'agit des fluides élastiques, par exemple de la vapeur d'essence de térébenthine, dans laquelle M. Biot a reconnu l'existence d'un pouvoir rotatoire, il faut employer des tubes beaucoup plus longs, parce qu'en général, pour produire le même effet, la longueur du trajet du rayon polarisé dans un liquide et dans sa vapeur doit être en raison inverse de leur densité respective.

Enfin, parmi les liquides soumis à l'expérience, nous indiquerons *la térébenthine, l'essence de laurier,* et *la gomme arabique*, comme faisant tourner le plan de polarisation de droite à gauche, et *l'essence de citron, le sirop de sucre, la solution alcoolique de camphre, l'acide tartrique et la dextrine,* comme le faisant tourner de gauche à droite.

Revenons maintenant aux expériences de Faraday. Nous avons vu que le magnétisme peut, par son influence, imprimer à un prisme de verre la même propriété que le quartz seul parmi les substances solides possède naturellement, savoir, de faire dévier le plan de polarisation. Toutes les substances transparentes, à l'exception peut-être de certains cristaux et des gaz, sont susceptibles d'éprouver cette influence ; mais le pouvoir rotatoire que l'action de l'aimant peut développer chez elles présente certains caractères particuliers qu'il est important d'étudier pour se faire une idée exacte de ce genre de phénomènes. En effet, quoique l'effet général soit le même, il y a

entre la polarisation circulaire produite par le magnétisme et celle qui est naturellement inhérente à certains corps, des différences notables. Ainsi, par exemple, cette dernière est d'autant plus considérable que la longueur du trajet à travers la substance est plus grande; il en est bien de même pour la première, mais à une condition, c'est qu'on ne soit pas obligé d'éloigner les armatures polaires pour loger la substance interposée, car alors on affaiblit la force magnétique et l'on perd d'un côté ce qu'on gagne de l'autre. Nous verrons plus loin quelles sont les lois que suivent cette diminution et cette augmentation, et quelles sont les limites de longueur pour la substance transparente et par conséquent d'éloignement pour les pôles qu'il ne faut pas dépasser pour avoir le maximum d'effet.

Il est important, pour obtenir la rotation du plan de polarisation, que la substance transparente (le verre pesant, par exemple) soit placée de façon que le rayon polarisé chemine dans la direction de la ligne qui joint les deux pôles de l'électro-aimant; l'effet, toutefois, peut avoir lieu lors même qu'un seul pôle agit à l'extrémité du prisme de verre; mais il est beaucoup plus faible. Il a également lieu si l'on substitue un aimant ordinaire en fer à cheval à l'électro-aimant. Mais, dans tous ces cas, il faut nécessairement que le prisme de verre soit placé de telle façon que les forces émanées du pôle unique ou des deux pôles contraires, et qui sont caractérisées dans leur direction par les courbes magnétiques, passent au travers du verre dans une direction parallèle ou à peu près à celle du rayon. Ainsi on n'observe aucun effet quand le prisme de verre est situé équatorialement, c'est-à-dire perpendiculairement à la ligne qui joint les pôles de l'électro-aimant.

Le sens de la rotation du plan de polarisation est, avons-nous dit, lié avec la position des pôles magnétiques, par rapport à la direction suivant laquelle chemine le rayon polarisé; et ce sens est tel que si le pôle nord de l'électro-aimant est tourné du côté de l'observateur qui reçoit le rayon, et par conséquent le pôle sud du côté d'où vient le rayon, la rotation a lieu, pour l'observateur, de gauche à droite. Si l'on change les pôles de place en changeant le sens du courant qui circule

autour de l'électro-aimant, la rotation a lieu de droite à gauche. On peut ramener à une loi très-simple le rapport qui existe entre le sens de la rotation du plan de polarisation et celui du magnétisme qui produit cette rotation; il n'y a qu'à, pour cela, supposer un morceau de fer doux mis à la place de la substance transparente, et se représenter la direction des courants qui, dans la théorie d'Ampère, circulent autour de ce morceau de fer en conséquence de l'aimantation qu'il éprouve. Or, la loi est que la rotation a lieu dans le même sens que celui suivant lequel cheminent ces courants. Une manière plus directe de mettre cette loi en évidence, c'est de remplacer l'électro-aimant par une bobine dans l'axe de laquelle on place le prisme de verre, de manière qu'il soit enveloppé, d'une de ses extrémités à l'autre, par une ceinture de courants électriques. L'effet de ces courants est de produire, de la même manière que les pôles magnétiques, la rotation du plan de polarisation; et le sens de cette rotation est tel qu'on peut dire que, quand un courant électrique circule autour d'une substance transparente qui transmet un rayon de lumière polarisé dans une direction perpendiculaire à celle du courant, il fait tourner le plan de polarisation de ce rayon dans un sens semblable à celui suivant lequel il chemine lui-même.

Quand on se sert de bobines ou d'hélices pour produire la rotation du plan de polarisation, on augmente notablement l'effet en les allongeant, parce que cela permet de donner plus de longueur à la substance traversée par le rayon, telle, par exemple, qu'une colonne d'eau; mais il est inutile de lui donner une longueur supérieure à celle de l'hélice dans l'intérieur de laquelle elle est placée. Il est également indifférent, quand le corps transparent a un diamètre moindre que celui de l'hélice, de le placer sur l'axe ou en dehors de l'axe, pourvu qu'il soit dans l'intérieur de l'hélice, car au dehors l'effet est nul. Enfin, quand on produit le pouvoir rotatoire au moyen des courants électriques, il faut prendre les précautions nécessaires pour empêcher que ces courants, qui sont ordinairement très-intenses, ne réchauffent la substance placée dans l'intérieur de l'hélice.

Après avoir étudié le phénomène dans sa généralité, examinons-le de plus près dans ses divers degrés de manifestation chez les différentes substances.

M. Faraday, dans ses premières recherches, avait déjà opéré sur un grand nombre de substances, soit solides, soit liquides; il n'avait pu découvrir aucune trace du pouvoir rotatoire, ni dans l'air ni dans les autres gaz, quoiqu'il les eût soumis à l'action d'un fort électro-aimant et à celle d'une longue hélice traversée par un courant énergique. Quant aux liquides, il en avait essayé un très-grand nombre et les avait tous trouvés capables d'acquérir, à des degrés différents, le pouvoir rotatoire sous l'influence du magnétisme, même ceux qui, comme l'essence de térébenthine, la possèdent déjà naturellement; et ce pouvoir rotatoire, surajouté par l'action magnétique, est tout à fait indépendant de celui que la substance a par elle-même, de telle façon que si les deux rotations ont lieu dans le même sens, elles s'ajoutent, et que si elles ont lieu en sens contraire, il faut soustraire la plus faible de la plus forte pour avoir le résultat définitif.

Cette loi a été vérifiée sur plusieurs liquides, tels que des essences, des solutions de sucre, d'acide tartrique et de tartrates, qui font tourner le plan de gauche à droite, comme aussi sur d'autres qui le font tourner de droite à gauche. Quant aux solides, Faraday a constamment trouvé que l'effet est à son maximum dans le boro-silicate de plomb, et subséquemment dans les verres qui renferment du plomb; mais il n'a pu réussir à le produire dans les cristaux doués de la double réfraction de quelque manière qu'ils fussent taillés. Le sel gemme, par contre, acquérait, sous l'influence magnétique, un pouvoir rotatoire à peu près égal à celui du flint, mais qui n'était guère que le tiers de celui du verre pesant.

M. Edmond Becquerel, pour renforcer l'action de l'électro-aimant sur les substances soumises à l'expérience, a eu l'heureuse idée de placer sur les surfaces polaires des armures percées chacune d'une ouverture cylindrique horizontale, à l'endroit même où se trouve le pôle magnétique, c'est-à-dire le point d'où semblent émaner les forces magnétiques. On dis-

pose les deux armures et la substance transparente de façon que le rayon polarisé, qui la parcourt dans le sens de sa plus grande longueur, puisse passer par les deux trous en dehors desquels est placé, d'un côté, le prisme polariseur, et de l'autre, le prisme analyseur. M. Becquerel a répété avec succès, au moyen de cet appareil, les expériences de M. Faraday; il s'est servi pour mesurer la rotation du plan de polarisation de l'observation de la teinte de passage signalée par M. Biot, et il a obtenu une déviation de 16° avec le verre pesant.

Il a reconnu que parmi les liquides, les chlorures, surtout celui de zinc, ont un pouvoir rotatoire considérable; une couche de chlorure de zinc, épaisse d'un centimètre, faisait dévier le plan de polarisation de 6°. Enfin, il a pu obtenir une légère rotation en soumettant à l'action magnétique quelques cristaux doués de la double réfraction; il a pris dans ce but deux plaques de quartz de même épaisseur et de rotation opposée, de sorte qu'en les plaçant perpendiculairement sur la route du rayon polarisé, leurs effets se neutralisaient : chacune des plaques avait 5 millimètres d'épaisseur. L'électro-aimant a agi, et l'effet s'est manifesté tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, suivant la direction de l'aimantation, comme sur une plaque de verre, mais beaucoup plus faiblement. La rotation magnétique a été de 5° avec un échantillon de béril, d'un centimètre d'épaisseur, placé perpendiculairement à l'axe. Voilà donc deux exemples qui prouvent que les cristaux biréfringents peuvent présenter le phénomène de la polarisation circulaire magnétique, quoiqu'à un degré bien plus faible que les autres substances.

M. Mathiessen, dans une série d'expériences, n'a trouvé, sur une centaine de cristaux qu'il a examinés, que le sel gemme qui fût sensible au magnétisme; la rotation qu'il produit pour l'épaisseur de 26 millimètres, qui est celle à laquelle a lieu le maximum d'effet, est un peu inférieure à celle du boro-silicate de plomb, car elle est de 6°, l'autre étant de 9°. Au reste, M. Mathiessen a trouvé plusieurs combinaisons vitreuses qui sont plus puissantes que le verre de Faraday, en particulier des silicates de plomb purs, qui donnent un effet plus que

double de celui du boro-silicate; malheureusement ils se ternissent rapidement à l'air. En soumettant à l'expérience deux cent vingt espèces de verre, le même physicien a pu déterminer assez exactement l'influence de la composition chimique sur le pouvoir rotatoire du verre ; il a trouvé que les silicates et les chlorures sont au premier rang sous le rapport de la sensibilité; que l'oxyde de plomb est la base qui agit le plus énergiquement, puis le bismuth, l'antimoine, le zinc, le mercure, l'argent. La rotation est manifeste dans les verres à bases magnétiques; peut-être donneraient-ils plus d'effet que tous les autres, si leurs couleurs foncées ne faisaient qu'on ne peut les employer qu'à l'état de lames très-minces. Un fait assez remarquable, c'est que lorsqu'un verre contient du fer, du colbat ou du nickel en assez petite quantité pour qu'il conserve une transparence suffisante, la rotation augmente graduellement avec l'épaisseur du verre, jusqu'à celle de 83 millimètres, qui est le plus grand écartement qu'on pouvait donner aux pôles dans l'appareil dont on faisait usage, tandis que les verres sans métal magnétique, et en même temps sans acide borique, sans soude et sans potasse, ont leur maximum d'effet à une épaisseur beaucoup moindre, qui varie entre 14 et 26 millimètres. Un électro-aimant qui pouvait porter 25 kilogrammes donnait, avec un silicate de plomb, 20° de rotation pour l'épaisseur de 15 millimètres, et n'en donnait point pour celle de 40 millimètres; avec le verre pesant de Faraday on a par contre, sous la même influence magnétique, 4° à 15 millimètres, et 9° à 40 millimètres d'épaisseur.

Faraday avait observé que l'action magnétique ne développe pas instantanément chez une substance le maximum de pouvoir rotatoire, mais que ce pouvoir augmente graduellement pendant quelques secondes, tandis qu'il cesse immédiatement avec l'aimantation. M. Mathiessen a remarqué que, pour certains verres légèrement trempés, l'augmentation du pouvoir rotatoire avec la durée de l'action magnétique est très-sensible, mais que cette augmentation a surtout lieu si l'on change les pôles de l'électro-aimant entre lesquels le verre est placé; c'est ce qui est arrivé à un silicate de plomb qui donnait d'abord

18°, et qui donna ensuite 20°, après trois ou quatre changements de pôles; un plus grand nombre de changements subséquents le fit retomber à 18°, puis à 15°. Après un certain temps de repos, on peut recommencer la même série d'opérations qui donnent les mêmes effets. Il semblerait résulter de là que l'interruption et le rétablissement brusque du magnétisme diminuent la trempe, et par conséquent augmentent la rotation du plan de polarisation; mais que, si elles sont répétées un trop grand nombre de fois de suite, elles redonnent une nouvelle trempe qui diminue le pouvoir rotatoire.

Au reste, l'expérience montre que c'est bien dans l'intérieur même du corps, et non à ses surfaces dont l'effet consisterait plutôt à amoindrir l'effet, qu'a lieu le phénomène de la polarisation circulaire magnétique. Six plaques d'un même verre superposées, dont l'ensemble constitue une épaisseur égale à celle d'un autre morceau unique de ce même verre, donnent une rotation moindre à peu près dans le rapport de 11 à 13; ces six plaques collées ensemble avec le baume de Canada reprennent presque la force du morceau unique.

Tous ces résultats sembleraient indiquer une certaine relation entre la constitution moléculaire des corps et la polarisation circulaire déterminée par le magnétisme; cependant l'influence de la nature chimique de la substance soumise à l'expérience est bien plus considérable, ainsi que cela résulte des recherches même de Faraday, de Becquerel, et surtout de celles de M. Bertin.

Ce dernier physicien, dans ses expériences, détermine ce qu'il appelle la rotation totale, c'est-à-dire l'angle que forment les deux plans de polarisation qu'on obtient en dirigeant le courant électrique, d'abord dans un sens, ensuite dans un autre; il est clair que cet angle est double de celui que nous avons appelé l'angle de rotation du plan de polarisation; mais cela importe peu, puisqu'il s'agit uniquement de rapports. De plus, il obtient la valeur de la rotation des deux plans de polarisation au moyen des deux teintes de passage, observées l'une quand le courant chemine dans une certaine direction, et l'autre quand il chemine dans une direction contraire. Ce mode d'observation

est supérieur en exactitude à celui qu'on emploie ordinairement, parce qu'il donne un angle plus grand et qu'il est indépendant de la détermination toujours fort incertaine du zéro, c'est-à-dire de la position de l'analyseur, pour laquelle la lumière est éteinte avant le passage du courant. M. Bertin a fait usage, dans ses recherches, soit d'un électro-aimant muni du système d'armatures employé par M. E. Becquerel, soit, avec plus d'avantage encore, d'un arrangement imaginé par M. Rumkhorff. Cet arrangement consiste à mettre les deux pôles de l'électro-aimant en regard; ce sont deux cylindres de fer doux de 3 centimètres de diamètre et de 9 de longueur, entourés d'un fil de cuivre de deux millimètres de diamètre recouvert de soie; ces deux cylindres, fixés horizontalement au moyen d'une double équerre en fer doux, de manière que leur axe soit sur la même ligne droite, sont percés d'un trou rond large de 1 centimètre dans le sens de cet axe, pour laisser passer librement un rayon de lumière (fig. 169); les deux pôles en regard sont à 1 centi-

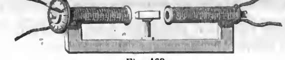


Fig. 169.

mètre de distance l'un de l'autre, et permettent dans cet espace l'interposition soit d'un corps solide, soit d'un petit tube contenant un liquide et terminé par deux surfaces planes.

Les deux prismes polariseur et analyseur sont fixés respectivement sur chaque montant de l'équerre, au centre du trou, de façon que la lumière rencontre l'un en entrant dans l'appareil, et l'autre en en sortant.

M. Bertin a encore employé avec avantage plusieurs bobines successives placées toutes sur le même axe, et renfermant un noyau en fer percé d'un trou cylindrique suivant l'axe; de façon que le rayon de lumière puisse librement cheminer en suivant la direction de l'axe d'un bout à l'autre. Si l'on place plusieurs verres dans les intervalles qui séparent les bobines, en ayant soin que le courant électrique les parcoure toutes dans le même sens, on trouve, comme on devait s'y attendre, que les rota-

tions produites par tous ces verres s'ajoutent, car elles ont toutes lieu dans le même sens, qui est celui de la direction du courant, d'après la loi trouvée par Faraday. On peut, par ce moyen, multiplier indéfiniment l'action d'une substance, et par conséquent rendre cette action visible, quelque faible qu'elle soit. Une paire de bobines de 10 centimètres de largeur, et renfermant chacune un cylindre de fer de 3 centimètres de diamètre, percé suivant l'axe, ont été centrées à la suite les unes des autres dans une gouttière en bois. Cette file présentait cinq intervalles, en y comprenant les extrémités, dans lesquelles on pouvait placer les substances soumises au magnétisme, et voici les résultats assez remarquables d'une expérience faite avec cinq petites cuves remplies de sulfure de carbone, présentant chacune une couche d'un centimètre d'épaisseur.

Avec 5 cuves placées dans les cinq intervalles.. .	8° 5' de rotation.
» 3 » (on enlève les deux extrêmes). . .	6° 25' »
» une seule (on enlève celles du milieu). . . .	2° »
Les 5 cuves en contact entre deux bobines doubles.	4° »

Diverses expériences semblables, faites avec d'autres substances, montrent également que l'augmentation de la rotation tient moins à l'augmentation d'épaisseur du corps soumis à l'influence magnétique, qu'à la répartition de ses différentes couches dans les intervalles des bobines.

Quelques physiciens avaient cru, à l'origine de la découverte de Faraday, que toutes les dissolutions avaient le même pouvoir rotatoire; les faits observés par M. Bertin démontrent de la manière la plus péremptoire que c'est une erreur. Voici, en effet, les nombres qu'il a trouvés pour la rotation opérée par diverses substances liquides anhydres et par l'eau.

	Épaisseur.	Rotation.
Bichlorure d'étain.	1 cent.	7° 30
Sulfure de carbone..	1 »	7°
Protochlorure de phosphore..	1 »	5°
Eau.	1 »	2° 20

Si nous passons aux dissolutions, nous leur trouvons un pouvoir rotatoire moindre que celui des liquides anhydres, sur-

tout pour les dissolutions alcooliques, qui sont inférieures à cet égard aux dissolutions aqueuses.

Ainsi :

	Épaisseur.	Rotation.
Chlorure de magnésium dissous dans l'eau.	13 cent.	6° 5'
» » » » » l'alcool. .	13 »	3° 20'
Eau.	13 »	4° 15'
Alcool à 36°.	13 »	3°

M. Bertin, désirant établir pour chaque substance son coefficient de polarisation magnétique, a cherché, dans ce but, à déterminer les lois qui régissent la double influence opposée qu'exercent sur l'intensité de la polarisation circulaire magnétique l'augmentation de l'épaisseur de la substance, et celle de la distance des pôles magnétiques qui l'accompagne nécessairement. Il est d'abord évident que, si la distance entre les pôles de l'électro-aimant reste constante, la rotation augmente d'une manière continue, jusqu'à ce que l'épaisseur soit égale à la distance des pôles. De plus, si les pôles sont assez éloignés des diverses couches du corps, pour que les variations de distance de celles-ci ne produisent pas de variations sensibles dans leurs rotations, l'action sera égale sur toutes, et la rotation observée sera proportionnelle à l'épaisseur des corps. C'est la loi que M. Faraday avait trouvée en employant des électro-aimants sans armatures. Mais si la distance des pôles varie avec l'épaisseur, c'est-à-dire si les armatures sont toujours mises en contact avec les extrémités du corps transparent, la rotation est soumise à deux influences qui doivent agir en sens opposé, puisque, lorsque l'épaisseur augmente, la distance des pôles augmente aussi, et par conséquent l'intensité de leur action diminue. L'un des effets peut compenser l'autre ; c'est ce qui arrive quelquefois. Ainsi, un morceau de *flint* très-dense donne, à 55 millimètres d'épaisseur, 22° 30' de rotation, et à 110 millimètres, 23° 30' ; la différence est presque nulle. Dans d'autres cas, la diminution d'intensité magnétique a une influence plus faible que l'épaisseur, jusqu'à une certaine limite ; et au delà de cette limite, c'est l'inverse. M. Bertin avait cru trouver, à la suite de nombreuses expériences, en employant une seule bobine, et en

éloignant successivement un morceau de *flint* qui avait été d'abord en contact par une de ses extrémités avec cette bobine, que, *si les distances du flint à la bobine croissent en progression arithmétique, les rotations du plan de polarisation décroissent en progression géométrique*. Puis, mettant le flint entre deux bobines, il était parvenu à déterminer l'action de chacune d'elles, action qui se complique de l'influence mutuelle variable avec leur distance relative, que les pôles magnétiques opposés entre lesquels le flint est placé, exercent l'un sur l'autre; il avait ainsi obtenu une formule dans laquelle un terme dépendant uniquement de la nature du corps soumis à l'expérience, et par conséquent indépendant de son épaisseur, de sa distance aux pôles et de la force de ceux-ci, pouvait être déterminé au moyen des données fournies par l'expérience; c'est ce terme qu'il avait appelé coefficient de polarisation magnétique. Il nous paraît que les expériences de M. Bertin ne sont encore ni assez nombreuses ni assez étendues pour qu'on puisse en tirer la loi générale qui l'a conduit à établir ce coefficient. Nous verrons dans le paragraphe suivant quelles sont les lois qu'on peut regarder comme bien démontrées dans cet ordre de phénomènes.

Mais auparavant cherchons à bien établir le caractère même du phénomène de la polarisation circulaire magnétique, et ses rapports de ressemblance ou de dissemblance avec celui de la polarisation circulaire naturelle.

Ces deux phénomènes sont du même ordre; ils se présentent sous la même forme, et nous avons vu d'après les expériences de Faraday que, dans le même liquide, la rotation naturelle et la rotation magnétique s'ajoutent ou se retranchent, selon qu'elles sont dans le même sens ou dans des sens opposés. Une expérience de M. E. Becquerel vient encore confirmer tout à fait cette manière de voir. Ayant obtenu une déviation de 16° avec le verre pesant de Faraday, il a préparé une dissolution de sucre qui, placée dans un tube de verre d'une longueur convenable, produisait la même déviation. Puis, faisant passer le rayon polarisé successivement à travers cette dissolution et le verre pesant soumis à l'influence magnétique, il a obtenu une déviation

de 32° ou une déviation nulle, suivant que les deux pouvoirs rotatoires agissaient dans le même sens ou en sens contraire.

Mais si les deux classes de phénomènes sont du même ordre, il y a entre elles une différence fondamentale ; elle est relative au sens de la rotation. Dans la polarisation circulaire magnétique, ce sens est absolu ; il ne dépend que de la direction des magnétismes ou des courants ; le rayon polarisé tourne toujours dans le même sens que celui suivant lequel cheminent les courants magnétiques qui agissent, soit directement, soit par l'intermédiaire du magnétisme, sur la substance soumise à l'expérience. Dans la polarisation circulaire naturelle, le sens est toujours relatif à la position de l'observateur par rapport au rayon polarisé, et à la substance qu'il traverse. Ainsi, si nous appelons *a* l'un des prismes de Nicol, et *b* le second, chacun pouvant indifféremment servir de polariseur ou d'analyseur, voici ce qui se passe dans le cas de la polarisation circulaire magnétique. Si, l'observateur étant en *a*, le pôle nord est du côté de *a*, et le pôle sud du côté de *b*, ou, ce qui revient au même, si les courants électriques circulent de gauche à droite autour de la substance transparente, le plan de polarisation sera dévié à la droite de l'observateur; mais si l'observateur se transporte en *b*, et que le rayon polarisé chemine de *a* en *b*, au lieu d'aller de *b* en *a*, toutes les autres circonstances restant les mêmes, le plan de polarisation est bien dévié de la même manière; mais cette déviation a lieu pour l'observateur, vu *sa nouvelle position*, à sa gauche et non plus à sa droite. Quand la polarisation circulaire est naturelle, les choses se passent tout différemment ; si l'observateur étant en *a*, le plan de polarisation est dévié de droite à gauche par une substance, telle que l'essence de térébenthine, cette déviation aura encore lieu de droite à gauche, pour l'observateur, quand il se transportera en *b*, et que le rayon polarisé cheminera de *a* en *b*, au lieu d'aller de *b* en *a*. Le sens de la déviation, relativement à l'observateur, sera bien resté le même ; mais son sens absolu aura changé ; résultat exactement inverse de celui que nous avons obtenu avec la polarisation circulaire magnétique.

Cette différence importante explique pourquoi on peut, dans

le premier cas, augmenter la déviation du plan de polarisation, en faisant aller et venir plusieurs fois le rayon dans la substance transparente soumise à l'influence magnétique, tandis que, dans l'autre cas, on ne gagne rien à ce mode d'opérer. Prenons, en effet, un morceau prismatique de verre pesant, de 1 centimètre 1/2 d'équarrissage, et de 6 centimètres environ de longueur; ayons soin que ses deux petites faces extrêmes soient bien polies, et recouvrons-les d'une feuille d'argent qui présente intérieurement une surface réfléchissante (fig. 170). Enlevons l'argent sur un espace seulement de 3 millimètres de largeur, sur chacune des deux faces, et disposons le verre de façon qu'un rayon de lumière polarisé introduit obliquement à travers la partie mise à nu de l'une des petites faces, vienne, après deux ou plusieurs réflexions sur la surface argentée, sortir par la partie également mise à nu de l'autre petite face. Si le verre est soumis à l'action magnétique, le plan de polarisation aura éprouvé une déviation trois fois plus considérable, après deux réflexions, que celle qu'il aurait exercée si le rayon n'avait parcouru que son trajet direct à travers le verre. En effet, il y a fait trois trajets au lieu d'un; et, à chacun, son plan de polarisation a été dévié d'un angle égal. S'il y avait éprouvé quatre réflexions, et par conséquent cinq trajets, cette déviation aurait été quintuple. Aussi trouve-t-on dans la combinaison expérimentale que nous venons d'exposer un moyen de multiplier considérablement l'effet rotatoire magnétique. Dans une expérience de M. Faraday, la déviation était de 12° pour un rayon qui n'avait traversé qu'une fois un morceau de verre pesant; elle devint de 36° quand le rayon, ayant éprouvé deux réflexions intérieures, eut traversé trois fois le morceau de verre; de 60° quand il l'eut traversé cinq fois, ayant éprouvé quatre réflexions intérieures. Ici la grandeur de l'effet obtenu est exactement proportionnelle à la longueur du rayon soumis à l'action de la force magnétique; cela tient à ce que l'on peut augmenter la longueur du trajet, sans rien changer à l'intensité de la force magnétique, tandis que, lorsque, pour obtenir cette augmentation, il faut allonger la substance transparente,

Fig. 170

on est obligé d'éloigner les pôles, et, comme nous l'avons déjà dit, on perd d'un côté pour gagner de l'autre.

Si l'on opère de la même manière avec une substance qui possède naturellement la polarisation circulaire, le résultat est tout autre. En effet, le plan de polarisation du rayon réfléchi, qui rétrograde dans la substance, éprouve une rotation égale à celle qu'il avait éprouvée dans le premier trajet du rayon; mais cette seconde rotation a lieu en sens contraire de la première, c'est-à-dire de gauche à droite, si la première avait lieu de droite à gauche; c'est ce que l'expérience nous a appris. Il en résulte que ces deux rotations s'annulent, et que lorsque le rayon réfléchi une seconde fois sort finalement de la substance, la déviation de son plan de polarisation, malgré ses trois trajets à travers cette substance, n'est pas plus considérable que s'il n'en avait fait qu'un. Généralement, si le nombre des trajets est pair, l'effet est toujours nul; s'il est impair, l'effet est le même que s'il n'y avait eu qu'un seul trajet.

La différence que nous venons de signaler permet de constater d'une manière très-simple la polarisation circulaire magnétique dans le quartz; il suffit pour cela d'une seule réflexion, et par conséquent de deux trajets du rayon polarisé dans ce cristal, car ce double trajet annule sa polarisation circulaire naturelle et double, au contraire, celle que détermine chez lui l'influence des pôles de l'aimant.


Fig. 171.

Une manière plus commode de démontrer l'effet opposé que produit, selon celui des deux cas dont il s'agit, le double trajet en sens contraire dans la même substance d'un rayon polarisé, consiste à employer pour ces expériences l'appareil très-simple de polarisation de Noremberg (fig. 171). Dans cet appareil, la polarisation

est produite par la réflexion de la lumière sur une glace transparente inclinée; la lumière est d'abord réfléchie de haut en bas par cette glace oblique, puis elle est réfléchie de bas en haut par une glace horizontale étamée placée au-dessous, et traverse verticalement la lame de verre oblique, pour arriver au cristal analyseur placé au haut de l'appareil, et qu'on peut faire tourner autour d'un cercle gradué. On dispose le miroir horizontal inférieur sur le pôle d'un puissant électro-aimant; puis sur ce miroir on met la substance transparente, un morceau de verre pesant de Faraday par exemple; tant que le courant ne passe pas autour du fil de l'électro-aimant, il n'y a aucun effet; mais dès qu'il passe, il faut tourner l'analyseur de 10°, si le verre a 18 millimètres d'épaisseur, et de 21° s'il en a 48, pour retrouver le plan de polarisation; ces deux nombres expriment donc la rotation de ce plan. Mais, par cette disposition, le rayon polarisé a traversé deux fois le verre pesant, une fois, quand réfléchi par la plaque de verre oblique, il se dirigeait de haut en bas; une seconde fois, quand réfléchi par la glace horizontale, il a été renvoyé verticalement de bas en haut. L'effet est donc doublé par la polarisation circulaire magnétique; il est, par contre, annulé pour la polarisation circulaire naturelle; aussi est-ce en opérant de cette manière que l'on constate le mieux la polarisation circulaire magnétique dans le quartz, puisqu'on annule la naturelle.

Revenons maintenant à la comparaison entre les deux modes de polarisation circulaire, et à la différence fondamentale que nous avons établie entre eux. Il est évident que la propriété rotatoire naturelle de certains corps, tels que l'essence de térébenthine, tient à la nature et non à l'arrangement de leurs particules, car, quelle que soit la direction suivant laquelle le rayon polarisé traverse ce fluide, la rotation qu'il éprouve est toujours la même de droite à gauche; elle ne dépend que de la direction du rayon lui-même. Le pouvoir qui la produit paraît donc appartenir, dans tous les sens et dans tous les temps, aux molécules du fluide. La polarisation circulaire magnétique n'existant, au contraire, que dans une seule direction, savoir, dans un plan qui est perpendiculaire à la ligne de force magnétique,

elle doit tenir en conséquence à une disposition particulière que le magnétisme imprime aux particules, d'après laquelle elles sont capables d'agir, dans certaines directions, d'une certaine manière qui dépend elle-même du sens de la force magnétique ou électrique, et non pas dans toutes les directions d'une manière uniforme, comme dans le cas précédent. La propriété rotatoire naturelle est donc inhérente à l'atome ou à la molécule, et, par conséquent, peut être considérée comme atomique ou moléculaire, ainsi que M. Biot l'a fait voir. La propriété rotatoire artificielle tient à une espèce de polarité imprimée à l'atome ou à la molécule, qui fait qu'elle n'agit que suivant une direction, et dans cette direction unique, dans un sens ou dans l'autre, selon que les polarités contraires sont d'un côté ou de l'autre.

Maintenant, qu'est-ce que cet état particulier de la molécule, cette polarité que lui imprime l'action du magnétisme ou des courants électriques? On a cru qu'elle n'était due qu'à un arrangement nouveau provoqué par cette action; en d'autres termes, plusieurs physiciens ont supposé que la propriété d'agir sur la lumière qu'acquièrent sous cette influence les corps transparents, provenait uniquement d'un changement dans la position relative des particules qu'elle déterminerait. On peut invoquer, à l'appui de cette opinion, d'abord l'analogie avec ce qui a lieu dans les corps magnétiques, tels que le fer doux, chez lesquels l'action du magnétisme, ou des courants électriques, provoque un nouvel arrangement des particules. Les expériences de M. Mathiessen, qui semblent indiquer une modification dans la trempe des verres soumis itérativement à l'action de puissantes forces magnétiques, conduiraient aussi à admettre que cette action modifie l'état moléculaire des corps. Enfin, les recherches de M. Matteucci sembleraient en fournir une preuve encore plus remarquable. Ce physicien a trouvé qu'une compression exercée sur le verre pesant, et sur le flint soumis à l'influence magnétique, modifie leur pouvoir rotatoire, et qu'elle le fait disparaître entièrement dans le crown. Les pièces soumises à la compression étaient cubiques, et elles étaient comprimées dans le sens normal à la direction du rayon pola-

risé, et par conséquent de la force magnétique. Pour faire l'expérience, on commence par comprimer le verre jusqu'à un certain point; on voit alors paraître les couleurs, et on tourne l'analyseur pour revenir au zéro; on fait alors passer le courant autour de l'électro-aimant : on a immédiatement encore une rotation; mais elle n'est plus égale dans les deux sens comme elle l'était avant que le verre fût comprimé. Ce qu'il y a de curieux, c'est qu'elle est plus forte dans le même sens dans lequel il a fallu déjà tourner l'analyseur pour retrouver le zéro sous l'effet de la simple compression sans aimantation. La différence est très-sensible : ainsi, avec le verre pesant comprimé, M. Matteucci a trouvé une rotation qui était de 5, 6 et même 8° dans un sens, et seulement de 3 ou 4 dans le sens contraire. Aussitôt que la compression cessait, les deux rotations devenaient exactement égales. Le flint donna des résultats semblables, mais un peu moins prononcés. Le même physicien a trouvé encore que l'élévation de la température augmentait, dans le verre pesant ou dans le flint, leur aptitude à manifester la propriété rotatoire sous l'influence magnétique. Employant toujours le même courant pour l'aimantation, il a presque doublé la rotation, en donnant au verre pesant sur lequel il opérait la température de l'huile bouillante. La rotation redevenait ce qu'elle était avant qu'on eût chauffé, quand le verre était refroidi.

Ces divers faits prouvent donc la relation des phénomènes découverts par Faraday, avec la condition moléculaire des corps soumis à l'expérience. Mais il y a loin de là à admettre que cette condition en soit la cause. En effet, sauf quelques traces encore assez douteuses de trempe observées par M. Mathiessen, rien jusqu'ici n'a montré directement que les forces électriques et magnétiques puissent influer par leur action extérieure sur la constitution moléculaire des corps solides non magnétiques. Il y a plus ; les liquides qui manifestent tous, quoiqu'à des degrés divers, il est vrai, la propriété rotatoire sous l'action magnétique, ne la doivent pas à une modification imprimée par cette action à leur constitution moléculaire; car on peut les agiter, les faire traverser par des courants électriques dans tous les sens, sans que

la propriété en soit le moins du monde altérée. D'ailleurs, des observations directes, faites avec beaucoup de soin, ne semblent pas indiquer que l'influence extérieure du magnétisme ou de l'électricité exerce aucun effet sur la constitution physique des liquides, sur leur volume, leur fluidité, etc.

Si ce n'est pas à une altération dans l'arrangement de leurs particules que les corps doivent le pouvoir rotatoire qu'ils acquièrent sous l'influence du magnétisme, il faut en chercher l'origine dans quelque autre modification qu'ils éprouvent sous cette influence. En effet, ce phénomène ne provient pas d'une action directe exercée par le magnétisme sur la lumière; le corps est un intermédiaire nécessaire, car un rayon polarisé, cheminant dans le vide ou même dans un gaz, n'éprouve aucune action de la part d'un puissant électro-aimant; c'est ce qu'ont constaté M. Faraday et plusieurs autres physiciens; la présence de molécules matérielles et de molécules assez rapprochées, telles que celles qui constituent un solide ou un liquide, est donc une condition nécessaire. D'un autre côté, l'action ne s'exerçant pas sur les particules, de manière à modifier en rien leur position relative, il est nécessaire d'admettre que c'est sur l'éther qui les enveloppe qu'elle a lieu; mais pour que l'éther en éprouve les effets, il ne faut pas qu'il soit isolé comme dans le vide, ou trop éloigné de particules matérielles comme dans les gaz; il faut qu'il soit dans l'état particulier qui résulte pour lui de la présence de molécules rapprochées. Or, cet état particulier consiste en ce qu'il est plus dense et plus élastique dans les milieux solides et liquides que dans les gaz, et surtout que dans le vide; ce qui, comme on le sait, est la cause du pouvoir réfringent considérable des deux premières classes de corps.

Ainsi, la force magnétique n'agirait sur l'éther que par l'intermédiaire des particules et que lorsqu'il est lui-même à un certain état de densité, provenant de l'action qu'exercent sur lui les particules entre lesquelles il est logé; et elle agirait d'autant plus fortement que cette densité serait plus considérable. Comme elle ne dépend pas seulement de celle du corps, c'est-à-dire du rapprochement des particules qui le constituent, mais surtout de la nature de ces particules, ce ne sont pas tou-

jours les corps les plus denses qui sont les plus réfringents, et par conséquent qui doivent éprouver la polarisation circulaire magnétique la plus considérable. L'expérience confirme tout à fait cette manière de voir; et si l'on jette les yeux sur le tableau, encore très-limité, il est vrai, et très-imparfait des coefficients de polarisation magnétique, on est frappé du fait que les substances se suivent dans ce tableau, à peu près dans le même ordre que dans le tableau de leurs pouvoirs réfringents. De nouvelles recherches sont nécessaires pour établir sur des bases plus solides l'analogie que je viens d'indiquer, et surtout pour déterminer la nature de la modification qu'éprouve l'éther sous l'influence magnétique; modification dont l'essence est de rompre l'uniformité de son mode d'action autour de la particule qu'il enveloppe, pour lui en substituer une autre, n'ayant lieu que suivant une certaine direction, et de plus en sens contraire aux deux extrémités opposées de cette direction; mode d'action que le mot de polarité caractérise très-bien. Nous verrons dans le paragraphe suivant l'idée qu'on peut s'en former.

Tout en n'attribuant pas la production du pouvoir rotatoire par le magnétisme à un dérangement moléculaire produit par cet agent, nous ne nions point que l'arrangement des particules d'un corps n'influe sur ses propriétés optiques, et par conséquent sur celle que nous avons désignée sous le nom de polarisation circulaire magnétique. Ainsi tout arrangement qui trouble l'uniformité de structure, tel que la nature en détermine dans les cristaux, et qu'on en produit artificiellement dans le verre, par compression, par exemple, donne naissance à des phénomènes de double réfraction et de polarisation, qu'on ne peut expliquer qu'en admettant que cette altération de constitution moléculaire a pour conséquence que, dans le même corps, l'éther n'a pas la même élasticité dans toutes les directions également; il n'est pas étonnant, par conséquent, qu'il modifie aussi le pouvoir rotatoire magnétique.

En résumé, dans les idées reçues aujourd'hui sur la constitution de la matière, nous estimons que les phénomènes découverts par Faraday doivent être attribués à une action des

aimants ou des courants électriques, s'exerçant ni sur les particules seulement, ni sur l'éther seul, mais sur la manière d'être des particules à l'égard de l'éther.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans ajouter que la chaleur rayonnante se polarise comme la lumière, ainsi que plusieurs physiciens ont réussi à le démontrer. C'est l'électricité qui fournit, comme nous le verrons plus tard, les instruments les plus propres à constater cette propriété, qu'on a pu cependant reconnaître aussi au moyen du thermomètre ordinaire.

M. Wartmann, peu de temps après la découverte de M. Faraday, annonça qu'un morceau de sel gemme placé sur la route des rayons de chaleur polarisés détermine la rotation du plan de polarisation, si l'on fait agir sur lui un puissant électro-aimant. Le sel gemme, dans cette expérience, joue pour la chaleur rayonnante le même rôle que joue le verre pour la lumière, c'est-à-dire qu'il la transmet sans qu'elle en éprouve une diminution très-sensible d'intensité; comme le verre, quand il est sous l'action du magnétisme, le sel gemme fait de même dévier le plan de polarisation des rayons qui le traversent, rayons qui sont ici des rayons calorifiques. MM. de la Prévostaye et Desains ont confirmé les résultats que M. Wartmann avait obtenus le premier, en employant des moyens un peu différents, et en se servant en particulier de la chaleur solaire. Ils sont même parvenus à mesurer la déviation du plan de polarisation, détermination très-difficile, et qui exige l'emploi de procédés et d'appareils fort délicats. Nous reviendrons sur ce sujet quand nous aurons fait connaître ces procédés et ces appareils.

§ 6. Rapprochement entre les divers phénomènes dus au pouvoir magnétique, et théorie générale de ces phénomènes.

Longtemps réduite à n'être qu'une action spéciale, ne s'exerçant que sur un très-petit nombre de corps, l'action de l'aimant est maintenant universelle, c'est-à-dire que tous les corps sont susceptibles de l'éprouver. Il est vrai qu'elle se manifeste sous diverses formes, mais ces formes elles-mêmes sont liées entre elles et se rattachent à un principe général; c'est ce que nous

allons chercher à établir. Mais auparavant, nous devons rappeler que l'action de l'aimant est identique à l'action qu'exercent extérieurement au circuit qu'ils parcourent des courants électriques fermés ; c'est ce qui est maintenant généralement admis par tous les physiciens, car cette identité repose à la fois sur des preuves mathématiques et sur des preuves expérimentales, et en particulier sur ce que les deux genres d'action peuvent, dans tous les cas, se substituer l'une à l'autre, pour produire dans les mêmes circonstances les mêmes effets [1].

Les formes diverses sous lesquelles se manifeste l'action de l'aimant ou celle des courants électriques fermés peuvent être ramenées à quatre principales :

1° Action sur les corps magnétiques, qui consiste dans une attraction, une force directrice, conséquence de cette attraction, avec une polarité magnétique ;

2° Action sur les corps diamagnétiques, qui consiste dans une répulsion et une force directrice, conséquence de cette répulsion, mais sans polarité magnétique sensible ;

3° Action sur les corps transparents, solides et liquides, qui consiste dans la propriété qu'ils acquièrent sous l'influence de cette action, de faire tourner, d'un angle plus ou moins grand, le plan de polarisation d'un rayon polarisé qui les traverse ;

4° Action sur tous les corps très-bons conducteurs, qui consiste dans le développement de courants instantanés chez ces corps, dits courants d'induction.

Si nous cherchons à découvrir les propriétés communes et caractéristiques d'une part des corps magnétiques, d'autre part des corps diamagnétiques, nous trouvons que les premiers sont ceux qui, sous le même volume, renferment le plus grand nombre d'atomes chimiques, et les seconds ceux qui en renferment le moins. Cette loi déjà signalée pour les corps magnétiques quand on ne comptait que le *fer*, le *nickel* et le *cobalt* parmi les métaux magnétiques, s'est trouvée acquérir une confirmation et une généralisation remarquables, depuis que Faraday a ajouté à la liste de ces métaux le *manganèse*, le

[1] Voyez le chap. II de la IIIe partie, p. 226 et suivantes.

chrome, le *titane*, le *cerium*, le *palladium*, le *platine* et l'*osmium*. En effet, tandis que les trois premiers métaux renferment sous le même volume 230 atomes, les sept suivants 170, les métaux diamagnétiques, tels que l'*or* et l'*argent*, n'en renferment que 150, l'*antimoine* et le *plomb*, 85, et le *bismuth* seulement 74 [1]. Deux métaux font seuls exception, le *cuivre*, qui renferme 230 atomes, et le *zinc* 170; mais ces deux métaux sont, comme nous le verrons dans le chap. I[er] de la 4[e] partie, d'excellents conducteurs de l'électricité, tandis que tous les autres métaux des deux mêmes catégories, qui sont magnétiques, sont de très-mauvais conducteurs. Il paraîtrait donc que le pouvoir magnétique serait une fonction directe du nombre des atomes renfermés sous le même volume, et inverse de la conductibilité électrique; c'est pourquoi l'*or* et l'*argent* seraient également diamagnétiques, et non magnétiques; ils sont en effet, avec le cuivre et le zinc, les meilleurs conducteurs de l'électricité, et ils ne renferment d'ailleurs que 150 atomes sous le même volume, au lieu de 230 et de 170.

Les corps diamagnétiques seraient donc ceux qui renferment, sous le même volume, le plus petit nombre d'atomes, ou qui, s'ils en renferment beaucoup, sont très-conducteurs de l'électricité. Il est à remarquer que ces derniers sont très-peu diamagnétiques, par conséquent très-près de la limite [2], et que même, comme nous le verrons plus loin, ils peuvent, dans certaines circonstances, devenir magnétiques. Mais un point important à signaler, c'est le rapport qui existe entre le diamagnétisme des corps et leur pouvoir rotatoire magnétique. C'est par erreur que les divers physiciens qui se sont occupés de ce sujet ont regardé ces deux propriétés comme indépendantes l'une de l'autre; M. Faraday avait bien, dès l'origine de ses recherches, saisi cette dépendance, et ce n'est pas sans raison qu'après avoir découvert que l'influence du magnétisme faisait

[1] On a pris pour calculer ces nombres les poids atomiques déduits des chaleurs spécifiques.

[2] Voyez, pour le zinc, le tableau dressé par Faraday, p. 495, et celui de E. Becquerel, p. 488.

tourner le plan de polarisation dans un prisme de verre pesant, il trouva que ce prisme se dirigeait équatorialement entre les pôles de l'électro-aimant.

Voici donc les rapports qui lient l'une avec l'autre ces deux propriétés. Le premier, c'est que la position que prend le corps diamagnétique pour se soustraire à l'action de l'aimant, c'est-à-dire la position équatoriale, est celle où ce corps ne possède plus de pouvoir rotatoire magnétique, en supposant que le rayon polarisé le traverse toujours dans le sens de sa longueur. Le second, c'est que toutes les circonstances qui augmentent dans le même corps le pouvoir rotatoire magnétique, augmentent également son pouvoir diamagnétique. Ainsi, M. Wiedemann a démontré que la rotation du plan de polarisation est proportionnelle à l'intensité du courant ou de l'aimant qui agit sur la substance, et nous avons vu d'un autre côté que le diamagnétisme est également proportionnel à cette intensité. On sait que les cristaux ont un pouvoir rotatoire magnétique très-faible; or, leur diamagnétisme l'est également par l'effet de leur constitution moléculaire, qui les fait diriger quelquefois axialement au lieu d'équatorialement. Le troisième rapport, c'est que les substances qui, par leur nature, ont le plus de diamagnétisme, sont aussi celles qui exercent l'action rotatoire la plus forte sur le plan de polarisation; et réciproquement, plus une substance est magnétique, moins cette action est prononcée. Ce fait ressort déjà des expériences de M. E. Becquerel et de celles de M. Bertin. Ainsi, le pouvoir rotatoire et le diamagnétisme de l'eau étant l'un et l'autre 10, le chlorure de magnésium a 16 pour pouvoir rotatoire, et 12 pour diamagnétisme; le sulfure de carbone 29,3 et 13,3; le chlorure de calcium 16 et 11,6. Quant aux corps magnétiques, le sulfate de nickel a 13,55 pour pouvoir rotatoire, et 21,60 pour magnétisme, le protochlorure de fer étendu 9,45 et 92, et le protochlorure de fer concentré 3 et 658. Le fait observé par M. Mathiessen, que, lorsqu'un verre contient un métal magnétique, mais en assez petite quantité pour que sa transparence n'en soit pas trop altérée, la rotation augmente avec son épaisseur, n'est point en opposition avec la règle que nous venons de poser,

car ici le corps qui agit sur la lumière n'est point le cristal magnétique, mais le verre; et le métal ne sert qu'à transmettre dans l'intérieur du verre la puissance magnétique émanée des pôles par lesquels il est lui-même aimanté. J'ai soumis moi-même un très-grand nombre de substances liquides à l'action de l'électro-aimant pour déterminer leur diamagnétisme relatif, au moyen d'une balance de torsion, au fil de laquelle étaient suspendus des tubes d'un verre très-mince et très-blanc, rempli successivement des divers liquides, et j'ai constamment trouvé que l'ordre de leur pouvoir diamagnétique était le même que celui de leur pouvoir rotatoire magnétique. Les nombres exprimant les deux pouvoirs ne sont pas, il est vrai, proportionnels, mais cela n'est point étonnant, car, vu la forme si différente des deux phénomènes qui manifestent l'action de l'aimant sur la substance, il est impossible d'admettre que les deux résultats soient la même fonction des forces mises en jeu dans cette double action.

Nous n'avons rien à ajouter à ce que nous avons dit précédemment sur l'induction; nous nous bornons à rappeler que son intensité est une fonction de la conductibilité des corps pour l'électricité, et qu'elle dépend, par conséquent, à la fois de leurs dimensions et du pouvoir plus ou moins conducteur de leurs particules.

Après avoir ainsi analysé les phénomènes qui sont dus à l'action de l'aimant et avoir cherché à établir les rapports et les différences qui existent entre eux, il nous reste à chercher une théorie qui les fasse rentrer dans un même principe général.

Le premier point que je tiens à constater, c'est que le diamagnétisme n'est point un magnétisme relativement plus faible. J'ai déjà combattu cette opinion qui assimile le diamagnétisme au magnétisme, opinion qui avait conduit forcément M. E. Becquerel à admettre que le vide est magnétique, et qu'il l'est plus qu'un très-grand nombre de corps; je n'y reviendrai donc pas; seulement j'ajouterai que jamais on n'a trouvé dans les corps diamagnétiques, quand ils sont sous l'influence de forts aimants, de traces de pôles tels qu'ils devraient en prendre si ces corps sont réellement doués de magnétisme.

Il est vrai, d'un autre côté, qu'on a cru leur avoir trouvé des pôles contraires à ceux qu'ils devraient avoir d'après la théorie de M. E. Becquerel, c'est-à-dire des pôles de même nom que les pôles magnétiques les plus rapprochés d'eux, ce qui ferait que le diamagnétisme semblerait être l'antagonisme du magnétisme. Nous avons déjà exposé (p. 473 et suiv.) les expériences par lesquelles Poggendorff, Reich et Weber croyaient avoir démontré que les aimants déterminent dans les corps diamagnétiques une polarité homonyme à la leur. Nous avons vu que ces expériences pouvaient recevoir une autre interprétation, et qu'en particulier, leurs effets étaient essentiellement dus à la production de courants d'induction autour de la surface des métaux soumis à l'influence des électro-aimants ou simplement à celle des courants fermés. Mais Weber a repris de nouveau le sujet et est parvenu à des résultats qui semblent effectivement favorables à l'idée de la polarité diamagnétique. Dans ce travail où il discute avec un soin remarquable tous les phénomènes magnétiques et diamagnétiques, il est amené, en attribuant les premiers à des courants moléculaires préexistants autour des particules et mobiles seulement avec elles, selon la théorie d'Ampère, à faire dépendre les seconds de l'existence, dans l'intérieur des corps, de fluides électriques mis à l'état de courant par une cause extérieure puissante, telle que les pôles d'un électro-aimant. Dans ce cas, les courants ne préexisteraient pas et ne seraient pas liés d'une manière indissoluble aux particules, comme dans le cas des corps magnétiques. Mais il est toujours conduit, par sa théorie, à admettre une polarité diamagnétique inverse de la polarité magnétique. Deux séries d'expériences lui semblent prouver l'existence de cette polarité. Dans la première, une longue hélice est placée verticalement entre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval très-léger, et suspendu délicatement à un fil de soie vertical, fixé par son extrémité inférieure, au milieu d'une traverse qui unit près de la partie coudée, les deux branches parallèles de l'aimant, lequel se trouve dans un plan horizontal. Quand l'hélice est traversée par le courant, tout est symétrique de part et d'autre; l'aimant ne bouge pas, les deux pôles étant

également ou attirés ou repoussés par l'hélice, suivant le sens du courant qui la traverse; mais si l'on fait mouvoir un cylindre de bismuth dans l'intérieur de l'hélice, on observe, en partant de la position où le milieu du cylindre est dans le plan de l'aimant, que, si on l'élève, l'aimant se meut dans un sens, et que, si on l'abaisse, il se meut dans l'autre, ce qui semble indiquer deux pôles opposés aux extrémités du cylindre. Avec un fil de fer substitué au bismuth, on observe le même mouvement, mais dans un sens contraire. Mais ce qu'il y a de singulier, c'est qu'un mouvement semblable, presque aussi fort, a lieu quand on fait mouvoir le bismuth dans l'hélice, sans que celle-ci soit traversée par un courant électrique; seulement le mouvement a une direction opposée; il est plus fort quand on élève le bismuth que quand on l'abaisse, ce qui est l'inverse quand l'hélice est traversée par le courant électrique. Il est évident que, dans ces expériences, le bismuth éprouve une modification dans ses rapports magnétiques ou électro-dynamiques, par le fait qu'il est entouré de courants électriques; cela n'est point étonnant, puisque, s'il était transparent, cette modification serait accusée par la rotation du plan de polarisation. Cet ensemble d'expériences semble prouver, en effet, que cette modification consiste dans la production d'une polarité telle que la conçoit Weber. Cependant, comment expliquer l'action du bismuth quand il n'est pas entouré de courants électriques? Dans ce cas, il devrait repousser également les deux pôles de l'aimant mobile, et celui-ci ne devrait, par conséquent, avoir aucun mouvement. Enfin, pour être bien certain que les courants d'induction ne jouent aucun rôle dans cette nouvelle forme donnée à ses expériences, Weber aurait dû employer d'autres métaux que le bismuth, et montrer que les effets obtenus sont moindres avec des métaux moins diamagnétiques.

La même observation s'applique, et avec plus de raison encore, à la seconde série des expériences de Weber. Dans cette série, on a deux hélices concentriques et bien isolées l'une de l'autre; l'extérieure est traversée par un courant électrique, l'intérieure est mise, par ses deux extrémités, en communica-

tion avec un galvanomètre, et un cylindre de bismuth s'y meut intérieurement. On a eu soin de tourner la moitié des spires de cette hélice intérieure dans un sens contraire à celui de l'autre moitié, de façon que les effets d'induction produits par l'introduction successive de deux pôles magnétiques différents puissent s'ajouter. L'expérience est conduite de manière qu'un commutateur mette le bismuth en mouvement en même temps qu'il change les communications de l'hélice avec le galvanomètre, de façon que les courants d'induction cheminent tous dans celui-ci, suivant la même direction, et que leurs effets s'ajoutent par conséquent. On obtient ainsi une série de courants induits, accusés par leur action sur le galvanomètre, et en remplaçant la tige de bismuth par un fil de fer, on en obtient également, mais dirigés, dans les mêmes circonstances, en sens contraire. On pourrait peut-être faire à M. Weber l'objection que la présence du cylindre de bismuth doit modifier l'action de l'hélice extérieure sur l'intérieure, et, par conséquent, expliquer le développement des courants accusés par le galvanomètre. Il aurait fallu, soit dans cette série d'expériences, soit dans la première, que M. Weber employât non-seulement des métaux différents du bismuth, mais aussi des métaux tirés en fils fins et formant des faisceaux, pour comparer leurs effets à ceux de métaux semblables formant des cylindres pleins; seule manière de bien distinguer les effets dus à la polarité de ceux qui proviennent de courants d'induction développés à la surface des masses introduites dans l'hélice.

Le fait de la polarité diamagnétique nous paraît toutefois assez bien établi par les nouvelles recherches de M. Weber, quoiqu'il ait encore contre lui quelques faits négatifs tels en particulier que ceux récemment signalés par M. Matteucci. Ce physicien a construit quatre hélices parfaitement semblables, qu'il a disposées verticalement aux quatre angles d'un plateau de bois carré; une aiguille astatique était délicatement suspendue au milieu des quatre hélices, et l'appareil était construit de façon qu'aucun mouvement n'était produit sur l'aiguille quand une décharge ou une série de décharges passaient dans les hélices. Il suffisait de remplir l'intérieur des deux hélices, placées à

l'extrémité de l'une des diagonales, d'un mélange de cire et de très-petites quantités de colcotar (oxyde de fer), pour obtenir des effets très-marqués au moment où la décharge passait. En remplaçant les cylindres magnétiques par des cylindres de bismuth, on n'a jamais obtenu le moindre mouvement de l'aiguille astatique. Cependant le pouvoir diamagnétique du bismuth était très-supérieur au pouvoir magnétique des mélanges de cire et de colcotar; ce qui semble prouver que le diamagnétisme n'est pas le résultat d'une polarité de même genre que la polarité magnétique. M. Matteucci a également constaté qu'en employant des corps diamagnétiques non conducteurs tels que le phosphore, le soufre, l'acide stéarique, au lieu de métaux, on ne produit aucun effet d'induction ni dans un sens, ni dans un autre. Nous verrons plus loin que les faits intéressants observés par M. Matteucci ne sont pas en opposition avec l'existence dans les corps diamagnétiques d'une espèce particulière de polarité.

M. Faraday n'admet point la polarité diamagnétique; nous avons déjà dit qu'il regarde l'action exercée par l'aimant sur les corps magnétiques et diamagnétiques comme les résultats de forces émanées des pôles des aimants, selon certaines directions qu'il appelle *lignes de force*, et dont l'ensemble constitue le champ magnétique. La présence d'un corps dans ce champ magnétique modifie les directions des lignes de force; si le corps est magnétique, il concentre les lignes de force; s'il est diamagnétique, il les fait diverger. Cette modification, apportée dans la distribution auparavant uniforme de ces lignes de force, donne naissance aux mouvements attractifs pour les corps magnétiques, et répulsifs pour les diamagnétiques. M. Faraday a fait une étude détaillée du champ magnétique et de la direction des lignes de force, dont la distribution de la limaille de fer, autour et entre les pôles des aimants, donne une idée assez exacte. Nous avons déjà vu qu'il a réussi à employer l'induction[1] pour démontrer l'égalité et la distribution de ces lignes de force dans le champ magnétique. Il résulte en effet des expériences que nous avons rapportées dans le chapitre

[1] Voyez chap. V, p. 441.

de l'induction [1] que, à quelque distance de l'aimant qu'on coupe ces lignes, le courant d'induction perçu par le fil en mouvement qui les coupe, a la même intensité; ce qui prouve que la force magnétique a une valeur définie, et que, pour les mêmes lignes de force, cette valeur demeure la même à toutes les distances de l'aimant; la convergence ou la divergence des lignes, non plus que l'obliquité plus ou moins grande de l'intersection, n'amenant aucune différence dans le montant de leur puissance. L'étude de la partie interne de l'aimant conduit à reconnaître que les lignes de force y ont aussi une puissance définie et parfaitement égale à celle des lignes extérieures, qui n'en sont que la continuation, et cela, quelle que soit la distance, qui peut être infinie, à laquelle elles sont prolongées.

Il ne faut pas perdre de vue que M. Faraday exprime, par les termes de lignes de force magnétique, la puissance de la force de polarité magnétique, et la direction suivant laquelle elle s'exerce. Si le champ magnétique est composé de forces égales et également distribuées, comme on l'obtient facilement avec un électro-aimant en fer à cheval, il suffit de placer une sphère de fer ou de nickel dans ce champ pour occasionner immédiatement une perturbation dans la direction des lignes de force. Les forces ne sont pas seulement concentrées, mais contournées ou modifiées dans leur direction par les sphères métalliques introduites; elles éprouvent une convergence sur les faces opposées d'une sphère magnétique, et une divergence correspondante sur les côtés opposés d'une sphère diamagnétique. C'est cette propriété que M. Faraday exprime par les mots de *conductibilité de polarité (conduction polarity)*. La température diminue le pouvoir que les corps possèdent d'affecter la direction des lignes de force, et même le leur fait perdre complétement à un certain point. C'est ce qu'on peut constater en remarquant qu'une petite aiguille aimantée, longue de trois millimètres, qui se plaçait toujours parallèlement aux lignes de force dans les différents points du champ magnétique, change d'abord de direction près des sphères de fer ou de nickel, puis reprend son paral-

[1] Voyez chap. V, p. 442.

lélisme, quand on chauffe à une température suffisante ces deux sphères. L'oxygène de l'air, qui, en vertu de ses propriétés magnétiques, doit modifier la direction des lignes de force du magnétisme terrestre, perd en grande partie aussi cette propriété par l'élévation de la température, ce qui fournit à M. Faraday, comme nous le verrons, une explication ingénieuse des variations diurnes de l'aiguille aimantée.

Le peu de mots que nous venons de consacrer aux idées théoriques de Faraday suffisent pour les faire comprendre; l'idée fondamentale de l'illustre physicien est, au fond, la négation de toute action à distance, et l'explication des phénomènes par des forces continues, formant ce qu'il appelle des lignes de force. Les corps, par leur présence, modifient ces lignes de force, et il en résulte des mouvements de direction qui se manifestent par la disposition de ces corps à se placer, suivant leur nature, axialement ou équatorialement, c'est-à-dire dans les places où la force est à son maximum, ou dans celles où elle est à son minimum. Un savant physicien anglais, M. Thomson, en appliquant le calcul et les notions de mécanique aux idées de Faraday, a trouvé qu'elles représentaient, d'une manière remarquablement exacte, ce qui se passe dans cet ordre de phénomènes, pourvu qu'on tienne compte de l'action mutuelle des parties dont se composent les corps soumis à l'influence magnétique. M. Thomson a même fait un assez grand nombre d'expériences sur de petits fils et sur des cubes de fer disposés de manières différentes, en les suspendant près et au dedans d'un anneau traversé par un courant électrique, et il a toujours vu que ces corps se plaçaient parallèlement aux lignes de force.

Nous ne saurions nous ranger complétement aux idées de M. Faraday, quelque ingénieuses qu'elles soient. Le champ magnétique existe-t-il réellement tel que le conçoit le savant physicien, c'est-à-dire indépendamment de la présence des corps qui en manifestent l'existence? Voilà le point sur lequel j'ai du doute. Je suis plutôt disposé à admettre que les forces magnétiques ne s'exercent qu'autant qu'il y a un corps qui détermine leur manifestation. M. E. Becquerel a déjà démontré que l'action de l'aimant sur les corps magnétiques et diama-

gnétiques est proportionnelle au carré de l'intensité de l'aimant ou du courant, et non pas à la simple intensité, ce qui montre que ces corps entrent pour leur part dans la production de l'effet, et qu'ils ne jouent pas un rôle simplement passif. M. Tyndall arrive à la même conclusion, à la suite de nombreuses expériences faites également sur des corps diamagnétiques et magnétiques. Il croit même avoir trouvé que le bismuth prend une polarité magnétique analogue à celle que prend le fer, mais seulement transversale et non longitudinale; il tire cette dernière conséquence des résultats qu'il a obtenus en entourant un morceau de bismuth soit ordinaire, soit cristallisé, quand il est suspendu dans le champ magnétique, d'une hélice traversée par un courant électrique; il a trouvé, en plaçant l'hélice tantôt parallèlement, tantôt perpendiculairement à la ligne axiale, des déviations considérables à la direction que doit prendre le bismuth quand il n'est pas entouré d'une hélice électrique, et il estime que ces déviations s'expliquent par un magnétisme transversal qui lui est imprimé par l'aimant. Mais, d'un autre côté, comment expliquer la répulsion? Ce qu'on peut dire de plus vrai, c'est, comme le remarque M. Tyndall lui-même, que la présence de l'hélice traversée par un courant électrique apporte dans le champ magnétique des modifications qui font changer de place aux lignes de plus grandes et de plus petites forces qui deviennent inclinées à la direction axiale ou équatoriale. Enfin, remarquons encore que si les lignes de force suffisent, comme l'admet Faraday, pour expliquer tous les phénomènes, pourquoi ces lignes ont-elles besoin de l'intermédiaire d'un corps pour agir sur le rayon polarisé, et ne peuvent-elles pas agir sur ce rayon directement dans le vide? résultat qu'on n'a pas pu réussir à obtenir en employant même une puissance magnétique très-considérable.

Il résulte donc pour nous de cette longue discussion :

1° Que les corps soumis à l'action de la force magnétique éprouvent des modifications qui déterminent les mouvements qu'ils exécutent sous l'action de cette force, ainsi que les autres effets qu'ils deviennent capables de produire, tels que la rotation du plan de polarisation;

2° Que ces modifications ne sont pas du même ordre dans les corps magnétiques et dans les diamagnétiques, en d'autres termes, que ces derniers ne prennent pas une polarité semblable à celle que prennent les corps magnétiques;

3° Qu'en conséquence, ni la théorie de E. Becquerel, qui assimile les corps diamagnétiques aux magnétiques, ni celle de Faraday, qui ne fait jouer aux corps qu'un rôle passif, ne nous paraissent rendre compte d'une manière satisfaisante des différentes formes sous lesquelles se manifeste le pouvoir magnétique, tandis que celle de Weber semblerait mieux représenter cet ordre de phénomènes.

Cherchons donc s'il n'y aurait pas moyen de rattacher cette dernière théorie à un principe général, en nous laissant guider uniquement par les résultats de l'expérience.

Quand on étudie les phénomènes électro-chimiques, on est forcément conduit, comme nous le verrons, à admettre une relation simple entre l'atome et l'électricité. Ampère avait supposé que chaque atome de la matière possède une électricité qui lui est propre, positive ou négative, et que, dans l'état d'équilibre, il est entouré d'une atmosphère d'électricité de nature contraire à la sienne, qui dissimule celle-ci. Cette hypothèse, qui rend compte assez élégamment d'un certain nombre de faits, est sujette à de grandes objections: en particulier, elle n'explique nullement comment le même atome doit tantôt être positif, tantôt négatif, suivant l'atome avec lequel on le met en rapport, ce qu'il faut pourtant admettre, si l'on veut expliquer un grand nombre de faits chimiques. Berzelius avait admis que chaque atome a deux pôles électriques, l'un positif, l'autre négatif; il avait fondé son hypothèse sur l'existence de ces deux pôles dans les molécules de la tourmaline et de certains cristaux; mais à cette hypothèse simple, il en avait ajouté une autre très-peu probable, fondée sur le fait qu'il y a des conducteurs qui transmettent mieux l'une des électricités que l'autre, fait démontré dès lors inexact; cette hypothèse était que les atomes sont unipolaires, c'est-à-dire qu'ils ne gardent qu'une de leurs électricités en se combinant, et qu'ils abandonnent l'autre. Nous verrons plus tard que cette dernière hypothèse n'est point néces-

saire pour expliquer les phénomènes chimiques et électro-chimiques, qui peuvent se concilier très-bien avec l'idée de la polarité, telle que l'a conçue Berzelius, sans avoir besoin d'y ajouter l'unipolarité. Je suis donc disposé à admettre dans l'atome une polarité naturelle; tous les faits relatifs au développement de l'électricité, en particulier par la chaleur, semblent y conduire, et quant à l'objection tirée de ce que l'atome étant naturellement sphérique, on ne voit pas de raison pour qu'il ait une polarité dans une direction plutôt que dans une autre, on n'a qu'à supposer, ce qui est loin d'être improbable, que chaque atome de la matière a reçu primitivement un mouvement de rotation sur lui-même; et dès lors on a pour l'atome un axe et un sens de rotation, et, par conséquent, un pôle différent à chaque extrémité de l'axe.

Partant de cette polarité primitive de l'atome, il nous est facile d'en déduire, d'après les lois connues de l'électricité, les propriétés que manifestent les corps sous l'action de l'aimant ou des courants électriques fermés. Remarquons d'abord que quand un atome est isolé, c'est-à-dire à une distance trop grande pour être influencé par les atomes voisins, les deux électricités accumulées aux extrémités de son axe doivent constamment se réunir par sa surface même, et cela avec d'autant plus de facilité qu'il est lui-même d'une nature plus conductrice. Soit en effet, fig. 172, *a* l'atome, *b* et *c* les extrémités de son axe ou ses deux pôles; l'électricité + portée constamment en *b* tend à s'unir par la surface de l'atome avec l'électricité négative portée en *c*; il en résulte donc un courant allant de *c* en *b* à travers l'axe, et de *b* en *c* sur toute la surface de l'atome. Ainsi, on peut considérer l'atome comme traversé par

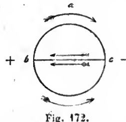


Fig. 172.

un courant qui revient à son point de départ par la surface de l'atome lui-même. Celui-ci est donc dans un état d'équilibre électrique, puisque les deux courants, dont l'un le traverse et dont l'autre l'entoure, sont égaux et de sens contraire. Mais si l'on rapproche un certain nombre d'atomes à une dis-

tance assez petite les uns des autres pour que leur influence mutuelle puisse s'exercer, alors ils se disposent de façon, fig. 173, que le pôle + de l'atome *a* soit en contact avec le pôle — de l'atome *b*, le + de *b* avec le — de *c* et ainsi de suite,

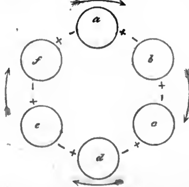


Fig. 173.

jusqu'à ce qu'ils forment une chaîne dont le dernier atome, par exemple, ait son pôle + en contact avec le pôle — de *a*. On a ainsi une molécule intégrante, entourée d'un courant électrique circulant autour d'elle; le nombre des atomes qui entrent dans sa formation dépend de la constitution moléculaire du corps qui n'est point régie non plus que la cohésion par la polarité électrique, mais qui dépend probablement de la masse de l'atome [1]. Pour que ce courant électrique dont nous venons de décrire la formation s'établisse autour de la molécule intégrante, il faut que celle-ci soit composée d'atomes très-rapprochés; or, quels sont les corps qui sont dans ce cas? Nous l'avons vu au commencement de ce paragraphe, ce sont les corps magnétiques. Ainsi donc, les corps magnétiques sont, par l'effet même du rapprochement des leurs atomes, des corps dont chaque particule intégrante composée d'un plus ou moins grand nombre d'atomes, est entourée d'un courant électrique. Dans l'état naturel, les particules livrées à elles-mêmes s'ar-

[1] Nous admettons ici avec tous les physiciens, que la différence qui existe entre l'atome chimique et la molécule intégrante ou physique est que la molécule n'est qu'une agglomération d'un plus ou moins grand nombre d'atomes.

rangent de façon que ces courants électriques se neutralisent tous mutuellement; mais si l'on vient à exercer sur le corps magnétique une action extérieure en lui présentant ou un aimant ou un courant électrique, on oblige les particules à se disposer de façon que leurs courants soient parallèles à ceux de l'aimant ou au courant qu'on leur présente. Voilà l'aimantation produite; elle est temporaire si les particules ne conservent pas la position que la force extérieure leur a imprimée après que cette force a cessé; elle est permanente si elles la conservent; c'est encore la constitution moléculaire des corps qui détermine le degré plus ou moins prononcé de cette propriété que nous avons appelée la force coercitive. Nous sommes donc ainsi conduits *à priori* à la théorie d'Ampère sur la constitution des aimants et à admettre que les courants électriques préexistent autour des particules et que l'aimantation consiste simplement à les disposer dans une direction commune; conséquence déjà tirée des effets moléculaires qui l'accompagnent. Remarquons que ce sont essentiellement les particules de la surface qui éprouvent cet effet de direction que tend au contraire à détruire l'influence des intérieures; ce qui explique le pouvoir de la trempe et pourquoi un aimant creux est plus fort qu'un aimant plein de même volume.

Deux métaux font seuls exception à la loi que nous venons d'établir : ce sont le cuivre et le zinc; ils devraient être magnétiques d'après leur volume atomique, et ils ne le sont pas; il est vrai qu'ils ne sont que très-faiblement diamagnétiques, mais ils le sont. Nous avons déjà remarqué que ces deux mêmes métaux sont de beaucoup les meilleurs conducteurs de tous ceux qui ont le même volume atomique; or cela nous explique pourquoi ils ne sont pas magnétiques comme les autres. En effet, pour que le courant électrique se forme autour de la molécule intégrante (ce qui caractérise le corps magnétique), il faut non-seulement que les atomes soient très-rapprochés, mais aussi qu'ils ne soient pas d'une nature assez conductrice pour que les électricités accumulées à leurs deux pôles puissent se réunir facilement par leur surface même comme lorsqu'ils sont isolés, plutôt que de s'unir avec les électricités contraires des deux

atomes entre lesquels chacun d'eux est interposé. Or, c'est ce qui arrive aux atomes de cuivre et de zinc à cause de leur grande conductibilité électrique. Aussi on peut rendre le cuivre magnétique en le combinant avec de l'oxygène ou du chlore qui diminuent son pouvoir conducteur.

Le magnétisme si prononcé de l'oxygène s'explique en admettant que chaque molécule d'oxygène est formée d'un groupe très-dense d'atomes élémentaires, hypothèse que confirme, comme nous le verrons, l'état ozoné de l'oxygène, qu'on obtient en désagrégeant ses particules. Il est assez remarquable, que l'oxygène qui est le seul gaz magnétique soit le seul aussi dont les particules puissent être désagrégées.

Remarquons enfin que la chaleur diminue et même fait disparaître le magnétisme, parce qu'en éloignant les atomes les uns des autres, elle rompt les chaînes électriques que ces atomes formaient, ou tout au moins diminue l'intensité du courant qui les traverse[1].

Passons maintenant au diamagnétisme. Ce qui distingue les corps diamagnétiques de ceux qui ne le sont pas, c'est que leurs atomes étant plus distants, il ne peut s'établir chez eux de chaîne électro-atomique naturelle; les atomes sont donc indépendants les uns des autres au point de vue électrique, et par conséquent dans cet état d'équilibre où leurs courants extérieurs neutralisent le courant intérieur dirigé le long de leur axe. Mais si l'on présente aux molécules intégrantes, composées d'un plus ou moins grand nombre de ces atomes, un courant extérieur fermé[2], ce courant ne pourra pas leur imprimer une direction particulière, puisqu'elles ne sont pas entourées d'un courant électro-atomique comme les particules magnétiques;

[1] Les expériences récentes faites sur la dilatation des corps et en particulier celles de Magnus et de Regnault sur la dilation des gaz ont démontré en effet, que la dilatation par la chaleur ne consiste pas seulement dans l'éloignement des particules intégrantes les unes des autres, mais aussi dans une dilatation propre de ces particules et par conséquent dans un éloignement des atomes mêmes dont elles sont formées.

[2] J'entends par action d'un courant extérieur fermé, l'action soit d'un courant voltaïque fermé, soit d'un électro-aimant, soit d'un aimant ordinaire.

mais s'il est suffisamment énergique, il déterminera chez ceux de ces atomes qui sont le plus rapprochés de lui, une direction telle que leur axe soit parallèle à sa propre direction, et qu'en même temps leurs pôles soient tournés en sens contraire de celui des particules polarisées du conducteur du courant, d'une manière analogue à ce qui a lieu dans l'induction électro-dynamique (p. 446). Ces atomes ainsi dirigés sous cette puissante influence, obligeront à leur tour les autres atomes de la molécule dont ils font partie à se diriger de façon à se correspondre par leurs pôles opposés, et à former ainsi une chaîne électrique dont le courant aura nécessairement un sens contraire à celui du courant extérieur, puisque ce sens est déterminé par les premiers atomes qui sont soumis directement à l'action de ce courant. Les choses se passeront de même pour les autres particules du corps diamagnétique, de sorte qu'elles se trouveront entourées, du moins toutes celles qui seront sous l'influence extérieure, de courants électriques ayant une direction contraire à celle des courants qui agissent sur elles, ce qui produira nécessairement une répulsion.

La différence entre un corps magnétique et un corps diamagnétique consisterait donc en ce que, dans le premier, les courants préexistants autour des particules, l'action extérieure d'un courant fermé n'a d'autre effet que d'imprimer à ces particules une direction commune, et telle que leurs courants soient parallèles à ceux qui agissent sur elles et dirigées dans le même sens; c'est ce qui constitue l'aimantation; tandis que, dans le second, les particules n'étant point entourées d'un courant électro-atomique naturel, elles ne changent point elles-mêmes de place, mais elles se trouvent, par la disposition que l'action extérieure imprime à leurs atomes, entourées d'un courant électrique dirigé dans un sens contraire à celui des courants qui agissent sur elles. On voit que nous arrivons ainsi aux mêmes conclusions que Weber, quant à la différence entre le magnétisme et le diamagnétisme.

Au fond, c'est un véritable phénomène d'induction qui se passe dans l'action exercée sur la molécule diamagnétique, avec cette différence que l'induction a lieu seulement dans la molé-

cule et non dans tout le conducteur, et qu'elle dure autant que la cause inductrice, au lieu d'être instantanée. Une autre différence, c'est que l'induction moléculaire a lieu aussi bien dans les corps non conducteurs que dans les conducteurs, tandis que celle qui donne naissance à des courants d'une grandeur finie ne peut être produite que dans des corps conducteurs.

Les causes de ces différences sont faciles à saisir quand on compare la nature même des deux phénomènes. L'induction électro-dynamique est le résultat, comme nous l'avons vu, de la polarisation des molécules intégrantes successives et des décharges des électricités contraires de ces molécules consécutives; c'est un phénomène purement physique dans lequel la nature même des particules ne joue aucun rôle, sauf en ce qui concerne leur degré plus ou moins grand de conductibilité électrique; il est tout à fait analogue aux effets d'influence de l'électricité statique et à ceux des électricités dissimulées. Aussi l'induction se manifeste de la même manière dans les corps magnétiques dont les molécules intégrantes sont entourées d'un courant électrique naturel, et dans les corps diamagnétiques dans lesquels ce courant moléculaire est induit; il faut seulement que le corps soit conducteur, et l'intensité de l'effet dépend du degré plus ou moins grand de conductibilité du corps. Il n'en est point de même de l'induction moléculaire, qui est la cause du diamagnétisme. Due à un arrangement particulier des atomes de la molécule, elle dure autant que l'action qui produit cet arrangement. On conçoit que cette action doive être très-énergique pour pouvoir troubler l'arrangement naturel des atomes, et pour déterminer ensuite la neutralisation continue des électricités contraires des atomes consécutifs, lors même qu'ils sont peu rapprochés et souvent mauvais conducteurs de l'électricité. Tous les faits sont d'accord avec cette manière d'envisager cet ordre de phénomènes. Ainsi non-seulement l'induction électro-dynamique se manifeste dans les corps magnétiques et même aimantés, comme s'ils ne l'étaient pas, mais elle est également simultanée avec le diamagnétisme et en trouble les effets quand les circonstances favorables à sa production se trouvent réunies.

Nous voyons donc que, par des causes d'un ordre tout diffé-

rent, les corps diamagnétiques ont, tant qu'ils sont sous l'influence de courants fermés, leurs particules entourées de courants ayant une direction contraire à celle de ces courants fermés, tandis que les particules des corps magnétiques ont sous cette influence leurs courants dirigés dans le même sens. Cette opposition explique très-naturellement tous les effets différentiels qu'on observe en mélangeant ensemble des substances magnétiques et diamagnétiques, et comment on peut parvenir à un mélange qui soit indifférent à l'action de l'aimant. Elle rend compte également des effets opposés observés par Weber, quand il introduit dans l'hélice traversée par les courants électriques, tantôt une tige de fer, tantôt un cylindre de bismuth; seulement, dans toute cette classe de phénomènes, il faut se mettre à l'abri de l'influence des courants d'induction superficiels, et pour cela n'agir qu'avec des masses très-divisées et non continues. Les expériences, dans lesquelles Matteucci n'a jamais pu obtenir le moindre effet sur l'aiguille aimantée en faisant passer une forte décharge dans une hélice, au centre de laquelle était un morceau de bismuth, tandis qu'il suffisait que le bismuth fût remplacé par un corps renfermant une quantité de fer presque imperceptible pour obtenir une action, tiennent à ce que le diamagnétisme exigeant pour se développer d'abord un certain arrangement des atomes, et ensuite la production du courant qui est la conséquence de cet arrangement, il ne peut être produit sous l'influence d'une décharge instantanée [1]; tandis que l'aimantation, n'étant que le résultat d'une direction imprimée à des particules déjà entourées d'un courant électrique, peut être déterminée instantanément. Enfin, il est facile de voir que tous les phénomènes magnétiques et diamagnétiques propres aux cristaux, pouvant être ramenés, d'après les travaux de MM. Tyndall et Knoblauch, à ceux que présenterait une agglomération de lames magnétiques ou diamagnétiques indépendantes, se concilient parfaitement bien avec la théorie qui explique les effets qui sont produits sur ces lames.

[1] M. Faraday et M. E. Becquerel ont tous les deux remarqué qu'il faut en effet un certain temps (quelques secondes) pour qu'un corps diamagnétique acquière tout le pouvoir rotatoire dont il est susceptible.

Quant à la rotation du plan de polarisation exercée par les substances transparentes diamagnétiques, elle tient évidemment non pas aux courants électriques moléculaires qui résultent de l'action de courants extérieurs sur ces substances, mais à l'arrangement des atomes que cette action détermine. Ainsi, les deux phénomènes, rotation du plan de polarisation et diamagnétisme, n'ont point entre eux la dépendance de cause à effet, mais celle d'être dus à la même cause, savoir, une disposition particulière des atomes dans les molécules intégrantes, ce qui s'accorde très-bien avec l'observation de M. Biot généralement admise, savoir, que la rotation du plan de polarisation est un phénomène tout moléculaire. On conçoit également comment le sens de la rotation doit dépendre du sens du courant qui la produit, puisque ce sens détermine l'arrangement des atomes des particules dans une certaine direction, et dans une direction précisément opposée quand lui-même il change. La preuve que ce n'est pas aux courants moléculaires qu'est due la rotation du plan de polarisation, se trouve dans le fait que les liquides magnétiques, dans lesquels ces courants existent naturellement, ne produisent pas le phénomène quand une action extérieure donne une même direction à tous les courants, ou le produisent à un si faible degré qu'on peut en conclure que l'effet ne provient que du liquide diamagnétique (l'eau ordinairement) dans lequel le corps magnétique est dissous. Il paraît également que dans les substances magnétiques les atomes qui constituent la molécule intégrante sont trop rapprochés pour que, lors même que leur action polaire mutuelle leur imprime un arrangement régulier, ils puissent agir sur le rayon polarisé. Il en est autrement pour les corps diamagnétiques dans lesquels l'action extérieure, tout en donnant aux atomes de la molécule une disposition analogue à celle qu'ont naturellement les atomes de la molécule magnétique, ne peut déterminer entre eux un rapprochement semblable, ce qui fait que le courant qui résulte de la direction commune qui leur est imprimée est toujours très-faible, mais ce qui permet en même temps à ces atomes d'agir individuellement sur la lumière polarisée et de produire la rotation du plan de polarisation avec une intensité dépen-

dante à la fois de leur nature propre, et de l'énergie de l'action qui les dirige.

Telle est la théorie qui, dans l'état actuel de la scienc , nous semble représenter le mieux tous les phénomènes relatifs au magnétisme et à l'action extérieure des courants électriques. Elle nous paraît se concilier très-bien avec les diverses observations que nous avons exposées, soit dans ce chapitre, soit dans les précédents. Il est vrai qu'elle n'explique pas la nature particulière de l'action de l'atome sur la lumière polarisée, mais elle montre seulement que, quelle que soit cette action, l'influence magnétique doit donner aux atomes une direction commune qui fait que toutes leurs actions concourent, et que la molécule, par conséquent, doit agir d'une certaine manière sur l'éther interposé.

Remarquons encore que nous avons été amenés, pour expliquer les phénomènes magnétiques et diamagnétiques, à nous occuper des différences spécifiques entre les corps, autres que celles tenant à leur conductibilité pour l'électricité, quoique nous eussions annoncé dans notre préface que les phénomènes généraux de l'électricité dynamique en étaient indépendants aussi bien que ceux de l'électricité statique. Cette déviation au principe que nous avions posé tient à ce que, au lieu de nous borner à l'exposition des lois générales de l'action des courants, nous avons été conduits forcément à étudier les modifications que ces lois éprouvent dans certains cas, modifications tenant à la nature même des corps au moyen desquels ces lois sont manifestées. Mais c'est surtout dans la quatrième et dans la cinquième partie que la nature des substances jouera un rôle important dans ses rapports avec l'électricité, et que nous pourrons suivre, dans ses conséquences, l'hypothèse qui a servi de base à la théorie que nous venons d'exposer [1].

[1] *Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre.*

Lallemand. — Attraction et répulsion des courants induits. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.) T. XXII, p. 19.

Coulomb. — Effets du magnétisme sur tous les corps. — *Journal de phys.* T. LIV (1802).

Becquerel. — Magnétisme transversal. — *Ann. de chim. et de phys.* T. XXV (1824), p. 269 et t. XXXVI (1827) p. 337.

Arago. — Oscillations de l'aiguille sur les substances non conductrices. *Ann. de chim. et de phys.* T. XXXII (1826), p. 21.

Lebaillif. — Répulsion de l'aiguille par le bismuth et l'antimoine. *Biblioth. univ.* (1829). T. T. XL, p. 83.

Faraday. — Diamagnétisme, *Arch. des sc. phys.* et (*Bibl. univ.*) T. II, p. 42 et 145 ; t. IX, p. 141 ; t. XVI, p. 52 et 89 ; t. X et XVII, p. 105. — Phénomènes magnéto-cristallins. *Id.* T. XII, p. 89. — Lignes de force du champ magnétique. — *Id.* T. XVI, p. 129 et p. 182 ; t. XIX, p. 54, et t. XX, p. 141. — Action du magnétisme sur la lumière polarisée. *Id.* T. I, p. 76 et 305, et t. III, p. 338. — *Trans. phil.* (1846, 1848, 1850, 1851 et 1852). *Phil. mag.*, septembre et novembre 1846.

Weber. — Polarité diamagnétique. — *Ann. der physik.* T. LXXIII (1848). p. 241, et t. LXXXVII (1852).

Poggendorff. — Polarité diamagnétique. — *Ann. der physik.* T. LXXXIII, p. 475 (1848).

Wiedemann.—Polarisation circulaire magnétique. *Ann. der physik*, (1850 et 1852), et *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*) T. XVII, p. 47.

E. Becquerel. — Action du magnétisme sur tous les corps. — *Ann. de chim. et de phys.* (N. S.). T. XVII, p. 449, et t. XXVIII, p. 253.

Plucker. — Détermination du pouvoir magnétique et diamagnétique des corps. — Phénomènes magnéto-cristallins. — *Ann. de chim. et de phys.* T. XXIX (N. S.), p. 129. *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XI, p. 196, et t. XVIII, p. 146, et t. XIX, p. 102,

Reich. — Idem. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XI, p. 41.

Verdet. — Induction diamagnétique. *Ann. de ch. et de phys.* (N. S.). T. XXXI, p. 187.

Tyndall et Knoblauch. — Phénomènes magnéto-cristallins. *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XIII, p. 219.

Matteucci. — Diamagnétisme, action sur la lumière polarisée et phénomènes magnéto-cristallins. — *Ann. de ch. et de phys.* (N. S.). T. XXVIII, p. 493. *Arch. des sc. phys.* t. XXII, p. 24, et t. XXIV p. 68.

Matthiessen.—Polarisation circulaire magnétique. *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. V, p. 126 et 212.

Bertin. — Idem. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXII (N. S.), p. 5.

Tyndall. — Phénomènes magnéto-cristallins et champ magnétique. —*Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVI, p. 177 ; t. XVIII, p. 211 et 215.

Thomson. — Champ magnétique. *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVI, p. 46, et t. XXIV, p. 260.

NOTES

RELATIVES

AUX DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES

DE QUELQUES POINTS PARTICULIERS.

NOTE A (p. 60).

CALCUL RELATIF AUX LOIS DES ATTRACTIONS ET DES RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES.

Dans l'expérience qui sert à établir la loi de l'inverse du carré de la distance pour les attractions et les répulsions électriques, on prend pour mesure de la distance qui sépare les deux boules électrisées, l'arc qui les sépare et non la corde qui est la véritable distance; de plus on ne tient pas compte du fait que la force répulsive ou attractive agit obliquement sur l'aiguille, et que par conséquent elle ne contribue pas tout entière à la faire tourner. Quoique l'obliquité soit très-petite vu le peu d'étendue des arcs, circonstance qui rend aussi très-peu sensible l'erreur qu'on commet en prenant l'arc pour la corde, il est cependant nécessaire, vu l'importance de la loi que cette expérience tend à établir, de montrer qu'elle en est bien une conséquence rigoureuse et non pas seulement approximative. Dans ce but, désignons par F l'intensité de la force totale, quand la distance entre les deux boules électrisées est l'unité; cette force à la distance D deviendra $\frac{F}{D^2}$, si l'on part de la supposition que la loi qu'on veut démontrer existe.

Soit $a\,b$ (fig. 174) la corde de l'arc qui sépare les deux boules et $c\,b$ le rayon de cet arc. Décomposant la force qui agit suivant $a\,b$, en deux, l'une dirigée suivant $c\,b$ qui est détruite par la résistance de l'axe de rotation, l'autre suivant $b\,t$ perpendiculaire à $c\,b$, et par conséquent tangente à l'arc, cette dernière seule contribuera au mouvement. Mais elle sera égale à la force dirigée suivant $a\,b$, c'est-à-dire à $\frac{F}{D^2}$ multipliée par le cosinus de l'angle $a\,b\,t$, lequel est complément de $a\,b\,c$; mais le triangle abc étant isoscèle, l'angle $a\,b\,c = 90 - \frac{1}{2} a\,c\,b$: donc, $\cos. a\,b\,t = \sin. a\,b\,c = \cos. \frac{1}{2}\, a\,c\,b = \cos. \frac{1}{2} a$, en appelant a l'angle $a\,c\,b$. Ainsi

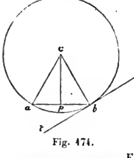


Fig. 174.

la force sera exprimée par $\frac{F}{D^2} \cos. \frac{1}{2} a$. D'un autre côté, la distance d ou la

corde $ab = 2r \sin. \frac{1}{2} a$, ce qu'on trouve immédiatement en menant la perpendiculaire cp, et en appelant r le rayon que décrit la boule mobile, c'est-à-dire cb; on a en effet $ap = r \sin. \frac{1}{2} a$ et $pb = r \sin. \frac{1}{2} a$; donc $ap + pb$ ou $ab = 2r \sin. \frac{1}{2} a$. Ainsi on trouve finalement pour expression de la force : $\frac{F \cos. \frac{1}{2} a}{4 r^2 \sin.^2 \frac{1}{2} a} = n$ T en appelant T l'angle de torsion qui fait équilibre à la force et qui lui est par conséquent proportionnel, et n le coefficient dépendant de la balance de torsion qui indique ce rapport. On tire de cette équation : $\frac{F}{4nr^2} = T \sin. \frac{1}{2} a \times \frac{\sin. \frac{1}{2} a}{\cos \frac{1}{2} a} = T \sin. \frac{1}{2} a \text{ tang. } \frac{1}{2} a = A$.

Cette dernière expression, que nous faisons égale à A, doit être constante, si l'hypothèse dont nous sommes partis, c'est-à-dire la loi de l'inverse du carré, est juste; car $\frac{F}{4nr^2}$ est une quantité constante, tant que la force F, c'est-à-dire la charge électrique des deux boules ne change pas, puisque n et r sont elles-mêmes des constantes qui ne dépendent que de l'appareil dont on fait usage.

Dans les expériences de Coulomb, où $a = 36°$, et $T = 36°$ également, on a : $A = 3{,}614$; ce qui donne pour T et a les valeurs suivantes :

Torsion donnée (T).	Angle de répulsion calculé.	Angle de répulsion observé.
36°	36°	36°
126°	18° 6′	18°
567°	9° 4′	8° 30′.

D'après des expériences de M. Riess faites suivant la même méthode, on a en commençant : $T = 42°$, $a = 42°$, d'où $A = 5{,}778$, ce qui donne pour T et a les valeurs suivantes :

Torsion donnée (T)	Répulsion calculée.	Répulsion observée.
42°	42°	42°
112°	27° 44′	28°
152°	23° 42′	23°.

Dans les deux séries d'expériences, il y a un léger écart entre le résultat du calcul et celui de l'observation, surtout pour l'expérience où les deux balles électrisées sont le plus rapprochées l'une de l'autre; mais la différence est moins marquée dans celles de M. Riess, ce qui tient à ce que les balles sont plus éloignées. Cet écart tient au changement dans l'état électrique des balles qui résulte de leur rapprochement, surtout lorsque ce rapprochement est considérable, changement dû à la décomposition par influence de leurs électricités naturelles.

La méthode suivie pour déterminer la loi de la répulsion des corps électrisés avec la distance ne s'applique que difficilement au cas de l'attraction, parce que la force de torsion et l'attraction étant toutes les deux

croissantes avec le déplacement de l'aiguille mobile, rien n'indique qu'il puisse exister une position d'équilibre, tandis que dans le cas de la répulsion, quand l'aiguille se déplace, la torsion augmente à mesure que la répulsion diminue par l'effet de ce déplacement, par conséquent on arrive nécessairement à une position d'équilibre. Il vaut donc mieux pour la loi des attractions employer la méthode des oscillations que nous avons indiquée à la note (2) de la page 60. Coulomb faisait usage d'une boule isolée d'un pied de diamètre, d'un petit disque de 7 lignes de diamètre placé à l'extrémité d'une tige mince de gomme laque suspendue horizontalement au moyen d'un fil de coton de 8 pouces de longueur. Il électrisait la boule positivement et le disque négativement; le dernier était placé successivement à des distances de 9, 18 et 24 pouces du centre de la boule, et chaque fois, après qu'il avait été mis en oscillation, on observait le temps de 15 oscillations. Ce temps avait été respectivement de 20, de 41 et de 60 secondes; en tenant compte de la déperdition de l'électricité qui avait eu lieu entre la première et la troisième expérience, il fallait réduire à 57 les 60 secondes. — Maintenant, le temps T, qui exprime la durée d'un certain nombre d'oscillations, est égal à $\frac{u}{\sqrt{\varphi}}$, φ étant la force motrice et u la durée de ce nombre d'oscillations. Mais $\varphi = \frac{1}{d^2}$, d étant la distance du centre de la boule au disque mobile, en supposant la loi de l'inverse du carré d'où on a $T = u\,d$. Maintenant si on détermine u par expérience à la distance d'un pouce, on trouve par la moyenne de trois observations $u = 2'',28$, et en calculant d'après cela u pour différentes distances, on trouve :

Distance du disque.	Durée de 15 oscillations. Calculée.	Durée de 15 oscillations. Observée.
9	20,15	20
18	41, 0	41
24	54, 7	57.

Cette concordance montre l'exactitude de la loi aussi bien pour les attractions que pour les répulsions.

NOTE B (p. 100)

RELATIVE AU POUVOIR CONDENSANT.

J'ai appelé électricités *condensées* et non électricités *dissimulées* les électricités telles qu'elles se trouvent dans les deux disques d'un condensateur ou dans les deux armures d'une bouteille de Leyde; car, au fond, ce qu'on a appelé *principe des électricités dissimulées* n'est point un principe, mais seulement un cas particulier du principe général qui détermine la répartition des deux électricités à la surface de plusieurs conducteurs en présence; ce cas particulier est celui de deux conducteurs très-rappro-

chés l'un de l'autre. L'action mutuelle des électricités des deux disques dans le condensateur ne diffère pas par sa nature, mais seulement par son intensité de celle qu'exercent les mêmes disques à de grandes distances. Le terme d'électricité dissimulée n'indique donc pas un mode particulier d'action, mais seulement une proportion d'électricité beaucoup plus forte qui se répartit sur les surfaces très-rapprochées de deux conducteurs en présence, ce qui fait qu'on ne peut les mesurer par le plan d'épreuve d'une manière directe.

Dans le cas du condensateur, le disque A est mis en communication avec la source d'électricité que nous supposons être positive, le disque B est mis en communication avec le sol; par leur rapprochement on décompose l'électricité naturelle de B; son électricité négative se porte à la surface voisine de A et réagit de même sur ce dernier disque. Lorsque l'équilibre s'est établi et que le disque A ne communique plus avec la source, on cherche à évaluer les quantités d'électricité condensées sur les surfaces de l'appareil. Supposons qu'il ait a d'électricité positive et b de négative réparties respectivement sur A et sur B, et qu'elles se fassent équilibre, si nous remplaçons a et b par des quantités d'électricité a' et b' qui leur soient proportionnelles, l'équilibre s'établira de même; de sorte que si on donne à A la quantité a' au lieu de a, il se développera spontanément sur B une quantité d'électricité négative b', telle qu'on aura $\frac{a}{b} = \frac{a'}{b'}$. Maintenant si on fait communiquer le disque A avec le sol et non plus le disque B, et qu'il n'y reste plus qu'une quantité a' d'électricité positive, les deux cas d'équilibre seront semblables, mais les deux disques auront changé de rôle, de sorte qu'on aura $\frac{b}{a} = \frac{a'}{b}$, car il devra exister entre a' et b le même rapport qu'entre b et a. Si l'on fait $\frac{b}{a} = m$, on aura $\frac{a'}{b} = m$, d'où $a' = bm$; $b = am$, et $a' = am^2$. — L'électricité qui a quitté A quand on l'a fait communiquer avec le sol est $a - a' = e$. — On a donc $e = a - am^2$, d'où $a = \frac{e}{1 - m^2}$ et $b = \frac{me}{1 - m^2}$.

L'électricité e est ce que nous avons nommé l'électricité libre; c'est celle que prendrait le disque A s'il était isolé et non sous l'influence de B, a étant la quantité totale d'électricité que prend ce disque quand il est sous l'influence de B; cette influence est exprimée par le rapport de $\frac{a}{e} = \frac{1}{1 - m^2}$ qu'on nomme le *pouvoir condensant* de l'appareil. — Pour le déterminer expérimentalement on n'a qu'à observer directement au moyen du plan d'épreuve les intensités totales a et b après avoir séparé les disques; on obtient ainsi $\frac{b}{a}$ ou m et par conséquent $\frac{1}{1 - m^2}$.

La valeur de m dépend du degré de rapprochement des deux disques; s'ils pouvaient être en contact immédiat, tout en restant isolés l'un de

l'autre sous le rapport électrique de manière que leur deux électricités ne se neutralisent pas, on aurait $m = 1$, et alors le pouvoir condensant serait $\frac{1}{0}$, c'est-à-dire l'infini. Mais il est facile de voir que ce cas ne peut se réaliser ; il faut toujours entre les deux disques une couche isolante ; et quelque mince qu'elle soit, son épaisseur n'est jamais nulle; mais plus cette épaisseur est faible, plus le pouvoir condensant est grand. — Si, par exemple, elle est telle qu'on ait $m = \frac{99}{100}$ on a $\frac{1}{1-m^2} = \frac{1}{1-\left(\frac{99}{100}\right)^2} = \frac{1}{\frac{10000-9801}{10000}} = \frac{10000}{199} = 50$, en remplaçant, ce qu'on peut faire sans erreur sensible, 199 par 200. Le pouvoir condensant serait donc égal à 50, c'est-à-dire que le disque en communication avec la source deviendrait, par le fait de l'influence exercée sur lui par le second, capable de se charger de 50 fois plus d'électricité qu'il n'en aurait pris s'il avait été en communication avec la même source, mais sans être sous l'influence du second disque.

Pour déterminer m expérimentalement avec un condensateur donné, on le charge d'électricité, puis on sépare les deux disques, en ayant soin qu'ils ne perdent pas leur charge électrique. On touche le premier avec le plan d'épreuve de la balance de torsion, et on obtient, en portant le plan à la balance, un angle t de torsion qui est proportionnel, d'après ce que nous savons, à la charge totale du disque, c'est-à-dire à a; on a donc $t = na$, n étant une fraction plus petite que l'unité. On en fait autant avec le second disque, chargé de l'électricité contraire b; on a un angle $t' = nb$ pourvu qu'on prenne la précaution de toucher ce disque dans un point placé d'une manière semblable à celle dont était placé le point qu'on avait touché sur le premier disque; il est essentiel de remarquer que les deux disques sont, du reste, parfaitement semblables, de même grandeur, de même forme, etc. On a donc $t' = nb$ et $t = na$, d'où $\frac{t'}{t} = \frac{b}{a} = m$.

Quand il s'agit d'une bouteille de Leyde, pour laquelle la couche isolante est très-épaisse, puisque c'est une lame de verre, la quantité m s'éloigne beaucoup de l'unité, et b est bien plus petit que a. Aussi, quand on réunit les deux armures de la bouteille pour opérer la décharge ou la neutralisation des deux électricités, il reste, après que cette décharge a eu lieu, une quantité d'électricité considérable dans l'armure qui a été en communication avec la source. On peut facilement calculer cette quantité, en se rappelant que $a = \frac{e}{1-m^2}$ et $a = mb = \frac{me}{1-m^2}$. Après la décharge, il reste donc sur l'armure qui était chargée de la quantité a la quantité $a - b$ ou $\frac{e}{1-m^2} - \frac{me}{1-m^2} = e\frac{(1-m)}{1-m^2} = \frac{e}{1+m}$.

NOTE C (p. 175)

RELATIVE A LA MESURE DES FORCES MAGNÉTIQUES.

Nous avons dit qu'il y avait deux méthodes pour mesurer les forces magnétiques, la première basée sur l'emploi de la balance de torsion, la seconde sur le principe des oscillations. Dans l'une et l'autre méthode, il faut tenir compte de l'action du globe terrestre, qui contribue, indépendamment de la force dont on veut mesurer l'intensité, à l'effet total que donne l'observation directe. Cette action du globe terrestre s'exerce en effet sur l'aiguille aimantée suivant des lois susceptibles d'être soumises à des calculs rigoureux, que la présente note est destinée à exposer sommairement, et dont les résultats non-seulement nous serviront à la démonstration des principes que nous avons déjà implicitement admis, mais nous seront indispensables, plus tard, dans l'étude que nous serons appelés à faire du magnétisme terrestre. Nous diviserons cette note en trois parties : 1° expression générale de l'effet du magnétisme terrestre sur une aiguille en équilibre; 2° loi du mouvement de l'aiguille quand elle est dérangée de sa position d'équilibre, mais assujettie à tourner autour de son centre de gravité en restant dans le plan du méridien magnétique; 3° loi de ce mouvement quand l'aiguille sort du plan du méridien magnétique.

§ 1. *Expression générale de l'effet du magnétisme terrestre sur l'aiguille en équilibre dans le méridien magnétique.*

Nous supposons (fig. 175) une aiguille aimantée $a\,b$, de figure quelconque, suspendue par son centre de gravité. Soit μ la densité du magnétisme libre en un de ses points, par exemple en M, ce point sera attiré par les forces provenant du pôle nord de la terre et repoussé par celles qui proviennent du pôle sud; les premières agiront suivant M A, les secondes suivant M B; ces deux forces auront elles-mêmes une résultante M R, située dans le plan formé par leurs directions. Nous appellerons cette résultante g', pour ne pas la confondre avec g, qui exprime la force de la pesanteur; l'effet total sur le point M sera donc exprimé par le produit $\mu\, g'$; chacun des autres points de l'aiguille sera donc sollicité par une même force g, puisque la résultante des forces magnétiques du globe ne doit pas varier dans la petite étendue qu'occupe la longueur de l'aiguille : μ seulement, c'est-à-dire

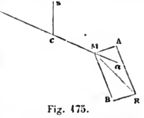


Fig. 175.

la quantité de magnétisme libre variera d'un point à l'autre. L'expression générale de l'effet sera donc sur chaque point $g' \mu \, d m$, $d m$ représentant l'élément de masse, pour lequel μ ne varie pas.

Remarquons que toutes les résultantes des forces magnétiques du globe représentées par g' sont parallèles, par conséquent toute les forces $g' \mu \, d m$ sont parallèles entre elles, et leur résultante générale est égale à leur somme. En désignant cette somme par S, on aura la résultante générale égale à $S g' \mu \, d m$. Mais $S \mu \, d m$ représente dans cette expression la somme des magnétismes libres dans chacun des points de l'aiguille. Or, comme il y a autant de magnétismes sud que de magnétismes nord, la somme $S \mu \, d m$ doit être égale à 0, et par conséquent la résultante générale $g' S \mu \, d m$ doit être nulle. Ce résultat indique que, lorsqu'une aiguille a pris la direction que tend à lui imprimer l'ensemble des forces provenant du magnétisme terrestre, ces forces ne peuvent lui imprimer aucun mouvement de translation dans l'espace. C'est ce que l'expérience confirme, car une aiguille d'acier n'augmente pas de poids par l'effet de l'aimantation, et, si elle est disposée comme l'indique la fig. 75, p. 160, elle ne s'en dirige pas moins comme si elle était suspendue immédiatement par son centre, sans être portée ni en avant, ni en arrière.

§ 2. *Lois du mouvement de l'aiguille assujettie à se mouvoir autour de son centre de gravité dans le plan du méridien magnétique.*

L'aiguille dont le mouvement va nous occuper est celle que nous avons appelée *aiguille d'inclinaison* (fig. 74, p. 157). Nous la représentons par une simple ligne droite, quoiqu'en réalité elle soit composée de plusieurs lignes droites parallèles; mais il est facile de voir que le cas réel peut être ramené au cas élémentaire hypothétique. Soit $a\,b$ (fig. 176), cette aiguille, soit M R la résultante g' des forces du magnétisme terrestre, comprise nécessairement dans le plan du méridien magnétique, et dont la direction forme avec la verticale un angle i constant pour le lieu où l'on est et à une époque donnée. En supposant l'aiguille suspendue par son centre de gravité, la résultante g' tend à détruire son horizontalité et à lui donner une inclinaison qui, dans notre hémisphère, fait pencher vers la terre la branche dirigée vers le nord, qui est celle où nous supposons situé le point M. Dans la fig. 3, on représente l'aiguille $a\,b$ comme n'étant déjà plus horizontale, et, pour savoir la direction qu'elle prendra, on décompose la résultante g' ou M R en deux composantes, l'une, M P, dirigée perpendiculairement à la longueur de l'aiguille, l'autre dirigée dans le sens même de la longueur de l'aiguille; la première est évidemment la

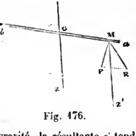


Fig. 176.

seule qui contribue à faire tourner l'aiguille, et elle est égale à g' cos. PMR; et en appelant z l'angle variable que forme la direction de l'aiguille avec la verticale, on a $PMZ' = 90° - z$ et $PMR = 90° - z + i$; or cos. PMR ou cos. $(90° - z + i) = $ sin. $(z - i)$, en sorte que la composante perpendiculaire devient égale à g' sin. $(z - i)$, et l'action exercée sur le point M est $\mu g'$ sin. $(z - i)$, en supposant qu'il y ait à ce point μ de magnétisme libre. Pour avoir l'effet réel de la force ou son moment autour du centre G de suspension, il faut multiplier son expression par la distance r de M à G, ce qui donne $\mu r g$ sin. $(z - i)$. Or $z - i$ est l'angle formé par la direction de la résultante avec celle de l'aiguille, ce qui montre que la force qui fait tourner le point M est analogue à celle qui ramène chacun des points d'un pendule à la verticale, laquelle, quand ce pendule est écarté de la verticale d'un angle a, est égale à g sin. a, g étant la force de la pesanteur; et son moment est $g\ r$ sin. a, r étant la distance de l'extrémité du pendule au centre de suspension.

Pour avoir l'effet non pas seulement sur le point M, mais sur toute l'étendue de l'aiguille, il faut considérer chacune de ses moitiés, en particulier, ou chacun des deux bras de levier Ca et Cb, la somme des moments pour chacun sera $S\mu r g' dm$ sin. $(z - i)$; mais g' sin. $(z - i)$ est une quantité qui ne change pas en passant d'un point à l'autre, on peut donc la regarder comme constante, et l'expression devient g' sin. $(z - i)$ $S\mu r d m$.

$S\mu r d m$ doit être obtenu séparément pour chacune des moitiés de l'aiguille, car les magnétismes y sont contraires et égaux; et si l'un tend à faire descendre l'aiguille, l'autre tend à la faire monter, de sorte que les effets s'ajoutent pour la faire tourner. Appelons S' et S'' les deux sommes; on a, pour le moment total qui sollicite l'aiguille g' $(S' + S'')$ sin. $(z - i)$, expression qui ne devient nulle que quand $z = i$, c'est-à-dire quand la direction de l'aiguille coïncide avec la résultante des forces magnétiques de la terre. Aussi, tant que l'aiguille est hors de cette position, elle est sollicitée à y revenir, et elle y revient en oscillant de part et d'autre autour de la direction de son inclinaison fixe, jusqu'à ce que son mouvement soit détruit par la résistance de l'air et l'inertie de la suspension. Ces oscillations de l'aiguille sont parfaitement analogues et soumises aux mêmes lois que celles qu'exécute un pendule écarté de la verticale pour y revenir en vertu de son poids. En effet, les forces magnétiques terrestres qui sollicitent les divers points d'une aiguille ont des directions parallèles entre elles comme les forces de la pesanteur, et de même que celles-ci ont une résultante appliquée à un point qui est le centre de gravité du corps, il existe sur chaque partie de l'aiguille où règne une même espèce de magnétisme un centre magnétique où l'on peut supposer appliquée toute la force magnétique de la terre. Il est vrai qu'ici les forces magnétiques ne sont pas égales entre elles, puisque μ, qui entre comme facteur dans l'expression $\mu g' dm$ varie d'un point de l'aiguille à l'autre; mais cette circonstance ne change rien à l'analogie que nous avons établie, car l'existence des centres de gravité ne dépend pas de l'égalité, mais uniquement du

parallélisme des forces de la pesanteur. On pourra donc calculer la position du point d'application de la résultante des forces magnétiques, comme on calcule le lieu du centre de gravité dans un corps pesant. La distance de ces points au centre de suspension sera, pour chacune des moitiés de l'aiguille, égale à la somme des moments divisés par la somme des forces, c'est-à-dire à $\frac{S\mu r\,dm}{S\mu\,dm}$; $S\mu\,dm$ n'est pas nulle ici, puisqu'elle n'est relative qu'à chacune des moitiés de l'aiguille.

Il résulte de ce qui précède que, de même que les intensités de la pesanteur se mesurent d'après la durée des oscillations très-petites faites par un pendule autour de la verticale, celles des forces magnétiques du globe terrestre pourront se mesurer par la durée des oscillations faites autour de sa direction normale par une aiguille d'inclinaison placée dans le méridien magnétique; et si, pour la même aiguille, cette durée varie d'un lieu à l'autre, on en pourra conclure que les intensités du magnétisme terrestre varient proportionnellement au carré du nombre des oscillations faites par l'aiguille dans un temps donné, ou inversement au carré du temps des oscillations. En effet, dans la formule du pendule composé $T^2 = \frac{\pi^2 S r^2 dm}{g S r\,dm}$, il faut mettre à la place du dénominateur la quantité $g'(s' + s'')$, qui exprime la somme des forces magnétiques du globe agissant sur toute la longueur de l'aiguille, et l'on a $T^2 = \frac{\pi^2 S r^2 dm}{g'(S'+S'')}$. Pour un autre lieu de la terre, on aurait avec la même aiguille $T'^2 = \frac{\pi^2 S r^2 dm}{g''(S'+S'')}$; S' et S'' ne changeront pas, car elles représentent pour chacune des branches l'aiguille la somme $S\mu r\,dm$, qui est constante pour une même aiguille dont le magnétisme est invariable.

On tire des deux équations ci-dessus : $\frac{T^2}{T'^2} = \frac{g''}{g'}$, ou en appelant N et N' les nombres des oscillations faites le même temps, $\frac{N^2}{N'^2} = \frac{g'}{g''}$.

Il serait facile maintenant, en faisant osciller une aiguille d'inclinaison sous l'action d'une force qui n'est pas le magnétisme terrestre, puis ensuite sous l'influence seule du magnétisme terrestre, de tenir compte de cette dernière influence, et par conséquent d'apprécier celle de la force donnée. Mais l'emploi de l'aiguille d'inclinaison présente plusieurs inconvénients dont les principaux sont la difficulté de placer l'aiguille exactement dans le méridien magnétique, et surtout l'impossibilité d'avoir un mode de suspension assez délicat pour que l'appareil soit bien sensible; en effet, l'aiguille est obligée de se mouvoir autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité, dont les deux extrémités reposent sur deux coussinets; système qui, quelque précaution qu'on prenne, présente un frottement considérable. Il y a donc avantage à se servir autant que possible, pour l'appréciation et la mesure des forces magnétiques, de l'aiguille

horizontale de déclinaison, dont le mode de suspension peut être aussi délicat que possible, plutôt que de l'aiguille d'inclinaison; et quoique dans la plupart des cas, le résultat de l'observation donne moins directement la mesure de l'effet qu'on désire évaluer, cependant, comme nous le verrons, on peut à l'aide d'une légère transformation dans les formules l'obtenir également.

§ 3. *Lois du mouvement de l'aiguille quand elle est mise en mouvement hors du méridien magnétique.*

Soit l'aiguille *a b* (fig. 177) et M R la résultante des forces magnétiques au point M; comme cette résultante est parallèle au plan du méridien magnétique et que *a b* n'est plus dans ce plan, M R n'est pas dans le même plan vertical que *a b*. On décompose la force M R ou *g'* en deux, l'une M Z' ou *z*, verticale, l'autre M H' ou H, horizontale et parallèle au plan du méridien magnétique; la première sera égale à *g'* sin. *i*, en appelant toujours *i* l'angle R M Z' que forme la résultante M R avec la verticale. Décomposons maintenant la force H qui est actuellement comme R M hors du plan vertical qui contient l'aiguille *a b*, en deux autres, l'une H P ou Y, perpendi-

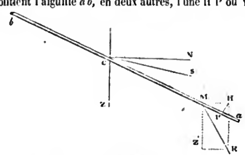


Fig. 177.

culaire à ce plan, l'autre M P ou X dirigée horizontalement dans ce plan; en appelant *a* l'angle que forme le plan vertical où se trouve l'aiguille avec le plan du méridien, nous aurons : $Y = H \sin. a$ et $X = H \cos. a$; ou, en mettant pour H sa valeur, nous aurons : $X = g' \sin. i \cos. a$, et $Y = g' \sin. i \sin. a$; et nous avons déjà $Z = g' \cos. i$. Tel est le système des trois forces qui agissent sur l'aiguille.

Examinons successivement ce qu'il devient dans le cas où l'aiguille aimantée est une aiguille d'inclinaison dont la suspension est telle qu'elle ne lui permet pas de sortir de son azimuth, et dans le cas où cette aiguille est une aiguille de déclinaison libre de se placer dans un azimuth quelconque, mais maintenue toujours par un contre-poids fixé à sa branche sud dans une direction horizontale.

a. Aiguille d'inclinaison.

Dans l'aiguille d'inclinaison suspendue de manière à ne pouvoir sortir

de son azimuth, la force Y qui agit perpendiculairement à cet azimuth pour la ramener dans le plan du méridien magnétique, quand on l'en a sortie, est détruite par la résistance de l'axe. Il ne reste donc que les deux autres forces qui ont une résultante R telle que $R^2 = X^2 + Z^2$, puisque les deux composantes sont perpendiculaires l'une à l'autre, mais $\frac{X}{Z} = \text{tang.}\, i'$, i' étant l'angle que leur résultante (qui naturellement n'est pas la même que celle des trois forces X, Z et Y, c'est-à-dire que M R) forme avec la verticale; ou en mettant à la place de X et de Z leur valeur on a :

$R^2 = g'^2 \sin.^2 i \cos.^2 a + g'^2 \cos.^2 i$,

ce qui donne :

$R = g' \sqrt{\cos.^2 i + \sin.^2 i \cos.^2 a}, = g' \cos. i \sqrt{1 + \text{tang.}^2 i \cos.^2 a}$.

on a aussi : $\text{tang.}\, i' = \frac{X}{Z} = g' \text{ tang. } i. \cos. a$.

Il résulte de ces formules que l'intensité de la force qui sollicite chacun des points de l'aiguille d'inclinaison, sortie du plan du méridien magnétique, diminue à mesure qu'on l'écarte de ce méridien, car elle diminue à mesure qu'augmente l'angle a que forme avec ce méridien l'azimuth où on la place; en effet, plus a est grand, plus cos. a est petit. La plus grande valeur de la force a lieu quand $a = o$, et par conséquent cos. $a = 1$, ce qui donne $R = g', \cos. i \sqrt{1 + \text{tang.}^2 i} = g' \sqrt{\cos.^2 i + \sin.^2 i}$, c'est-à-dire $R = g'$, ce qui doit être, puisque lorsque $a = o$, l'aiguille est dans le plan du méridien. La plus petite valeur a lieu quand $a = 90°$, alors cos. $a = o$, et $R = g' \cos. i$; c'est ce qui a lieu quand l'azimuth de l'aiguille d'inclinaison est perpendiculaire au plan du méridien magnétique.

Ce n'est pas seulement la valeur, mais aussi la direction de la force R, qui varie avec la valeur de l'angle a; en d'autres termes, l'aiguille d'inclinaison change de direction, quand on la change d'azimuth. D'abord, dans le plan du méridien magnétique où a est nul et cos. $a = 1$, on a tang. i' = tang. i, d'où $i' = i$, ce qui doit être, puisque la résultante de X et de R est la même que celle de X, de Z et de Y, c'est-à-dire la résultante RM des forces magnétiques du globe. On peut remarquer aussi que c'est dans le plan du méridien magnétique que l'aiguille d'inclinaison forme le plus grand angle avec la verticale, ou, ce qui revient au même, s'incline le moins au-dessous de l'horizontale, car la plus grande valeur de i' correspondante à cos. $a = 1$, c'est d'être égale à i. Quand l'aiguille d'inclinaison est placée dans un plan perpendiculaire à celui du méridien magnétique, on a : $a = 90°$ et cos. $a = o$, d'où tang. $i = o$, c'est-à-dire que la direction de la résultante fait un angle nul avec la verticale, ou, ce qui revient au même, coïncide avec elle. Ce dernier résultat fournit un moyen très-simple pour déterminer le plan du méridien magnétique avec l'aiguille d'inclinaison seule, sans avoir besoin de recourir à celle de déclinaison. En effet, on n'a qu'à trouver l'azimuth dans lequel l'aiguille se tient exactement verticale, puis en s'en éloignant de 90°, on a le plan méridien, et par conséquent on peut déterminer l'inclinaison en plaçant l'aiguille dans ce plan.

On peut également, au moyen de la valeur de tang. i, déterminer l'inclinaison méridienne i' d'une manière indirecte, méthode dont on se sert constamment pour vérifier le résultat de l'observation directe. Il n'y a pour cela qu'à observer i' dans deux azimuths quelconques formant entre eux un angle droit; en effet, désignons par i' et i'' les deux angles observés, on aura :

$$\text{tang. } i' = \text{tang. } i \cos. a,$$

et par conséquent $\text{tang. } i'' = \text{tang. } i \cos. (90 - a) = \text{tang. } i \sin. a;$

d'où $\text{tang.}^2 i (\cos.^2 a + \sin.^2 a) = \text{tang.}^2 i' + \text{tang.}^2 i'';$

d'où $\text{tang. } i = \sqrt{\text{tang.}^2 i' + \text{tang.}^2 i''}.$

On peut, par ce procédé, multiplier les observations dans différents plans, et en prenant une moyenne entre elles, affaiblir les erreurs d'observations partielles.

Quant aux oscillations, tout ce que nous avons dit sur celles qui sont produites par la résultante g' dans le méridien magnétique, s'applique également aux oscillations produites par la résultante R des deux forces X et Z, dans le plan quelconque où l'aiguille est forcément dirigée. Seulement la force g' devient $g' \cos. i \sqrt{1 + \text{tang.}^2 i \cos.^2 a}$, facteur qui ne renferme que des termes constants, tant que l'aiguille reste dans le même azimuth.

b. Aiguille de déclinaison.

Nous avons dit que toutes les fois que cela était possible, il y avait avantage, surtout dans la méthode des oscillations, à employer l'aiguille horizontale dont la suspension plus directe rend les observations susceptibles d'une beaucoup plus grande précision. Quand on écarte l'aiguille de déclinaison du méridien magnétique, il n'y a pas comme pour celle d'inclinaison un obstacle qui l'empêche d'y revenir. Aussi la composante Y, qui agit perpendiculairement au plan vertical dans lequel l'aiguille se trouve, pour la ramener au méridien magnétique, n'est point détruite. Mais comme on a soin au moyen d'un petit contre-poids de rendre l'aiguille horizontale, l'effet de la force verticale Z qui tendait à la faire tourner dans le plan vertical devient nul. Quant aux forces horizontales X, qui sont toujours dirigées dans le sens de la longueur de l'aiguille, elles n'ont aucune influence pour la faire changer d'azimuth, et la force directrice est donc uniquement exprimée par Y. Pour avoir son effet total sur l'aiguille, il faut la multiplier par μ, quantité de magnétisme libre au point où elle agit, par $d\,m$ l'élément de masse, et par r la longueur du bras de levier au bout duquel elle agit perpendiculairement, ce qui donne pour le moment : $g' \sin. i \sin. a\, \mu\, r\, d\,m$, en mettant à la place de Y sa valeur trouvée plus haut; mais cette expression n'est relative qu'au moment d'un seul point; faisant donc la somme de tous ces moments pour tous les points de l'aiguille, on a : $g' \sin. i \sin. a\, S\, \mu\, r\, d\,m$; et en prenant la somme séparément

pour chacune des moitiés, on obtient pour l'expression du moment total qui agit sur l'aiguille, g' (S' + S'') sin.i sin.a.

Il n'y a dans cette expression que sin.a qui varie quand on change l'azimuth dans lequel est l'aiguille. Aussi nous retrouvons la loi que nous avons déjà déterminée directement par l'expérience, savoir : *Que la force qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique, quand on l'en a écartée, est proportionnelle au sinus de l'angle que le nouveau plan vertical dans lequel elle est située fait avec le plan du méridien magnétique.*

Il ne nous reste plus à examiner que ce qui concerne la méthode des oscillations appliquée à l'aiguille horizontale. Pour les observer avec précision, il faut suspendre l'aiguille horizontalement à un ou plusieurs fils de cocon disposés parallèlement, de manière que leur torsion soit insensible ; puis, écartant l'aiguille tant soit peu du méridien, on l'abandonne à l'action des forces horizontales qui agissent sur elle. La force verticale Z est détruite ici comme dans le cas précédent, mais l'aiguille n'étant plus assujettie par son mode de suspension à tourner uniquement autour de son centre, la force X, qui agit dans le sens de sa longueur, contribue à son mouvement aussi bien que Y, qui agit perpendiculairement au plan dans lequel elle se trouve. Or, la résultante des deux forces horizontales est, comme nous l'avons vu, $H = g'$ sin.i. Il n'y a donc qu'à remplacer g par g' sin. i dans la formule tirée de celle du pendule, qui exprime le nombre et le temps des oscillations pour l'aiguille d'inclinaison située dans le plan du méridien magnétique. Or, sin. i est pour un même lieu, à une même époque tout aussi constant que g', ce qui revient à dire que l'inclinaison de l'aiguille aimantée peut être regardée comme constante dans un même lieu aussi bien que l'azimuth du magnétisme terrestre, du moins entre certaines limites de temps plus que suffisantes pour les observations ; il résulte de là que la substitution de la constante g' sin. i à la constante g' ne change rien aux conclusions que l'on peut déduire des expériences, et que l'on peut tirer les mêmes conséquences de l'observation du nombre des oscillations, en employant l'aiguille horizontale au lieu de l'aiguille d'inclinaison, puisqu'il s'agit uniquement de rapports dans lesquels l'intensité absolue et constante de la force provenant du magnétisme terrestre disparaît. Voyez à cet égard (p. 177 et 182) l'application que nous avons faite de la méthode des oscillations de l'aiguille horizontale à la détermination des lois de la distance et de la distribution des forces magnétiques dans un barreau aimanté.

NOTE D (p. 181).

DÉMONSTRATION PAR LE CALCUL DES COURBES MAGNÉTIQUES DE LA LOI DE L'INVERSE DU CARRÉ DE LA DISTANCE [1].

Nous allons faire voir, en partant de la forme des courbes magnétiques

[1] Cette note m'a été fournie par M. Cellerier ; elle est publiée maintenant, pour la première fois.

observées par le docteur Roget, que l'action de chacun des pôles d'un barreau aimanté sur ceux qu'ils déterminent par influence dans une particule de limaille de fer, varie en raison inverse du carré de leur distance.

Désignons par A et B deux pôles magnétiques, de nom contraire ou de même nom, entre lesquels se forme la courbe magnétique, et cherchons d'abord l'équation de cette dernière par rapport à deux axes rectangulaires menés dans son plan. Nommons M un quelconque de ses points, dont les coordonnées seront x et y; prenons pour axe des x la ligne AB, l'origine étant en son milieu O, les x positives étant comptées du côté OA, et et les y positives du côté de la courbe.

Désignons par h la longueur $OA = OB$; par r et r' les distances AM, BM, et par i, i' les angles MAB, MBA; abaissons enfin de M sur AB la perpendiculaire MP. On a évidemment $AP = AM \cos. MAB = r \cos. i$; d'autre part $AP = AO - OP = h - x$; par conséquent $\cos. i = \frac{h-x}{r}$; on trouvera de même $\cos. i' = \frac{h+x}{r'}$ D'après la première loi de M. Roget, on a dans toute l'étendue de la courbe $\cos. i \pm \cos. i' = \text{const.}$, en prenant le signe supérieur ou l'inférieur suivant que les pôles A et B sont de nom contraire ou de même nom. En remplaçant $\cos. i$, $\cos. i'$ par leurs valeurs ci-dessus, on trouvera l'équation de la courbe :

$$\frac{h-x}{r} \pm \frac{h+x}{r'} = \text{const.}$$

Ici r, r' sont mis à la place de leurs valeurs,

$$r = \sqrt{\overline{AP}^2 + \overline{MP}^2} = \sqrt{(h-x)^2 + y^2},\ r' = \sqrt{(h+x)^2 + y^2}.$$

Maintenant, soient A'B' les pôles d'une particule de limaille située en M; A' étant de même nom que A. La résultante des actions de A et B sur A', et celle de leurs actions sur le point très-voisin B', seront évidemment deux forces égales, mais de sens contraire; leur direction commune est celle que prendra d'elle-même la particule A'B', si elle est libre de se mouvoir. Elle sera donc tangente à la courbe que forment plusieurs particules, en adhérant les unes aux autres par leurs pôles de nom contraire, car la petite droite A'B' est alors un élément de cette courbe.

Nommons g l'angle compris entre l'axe des x et la tangente à la courbe au point M; on aura comme on sait : $\text{tang. } g = \frac{dy}{dx}$, et la dérivée $\frac{dy}{dx}$ s'obtiendra en différenciant l'équation de la courbe, en faisant varier à la fois x et y. On trouve ainsi, par les règles connues

$$\frac{-r\,dx - (h-x)\,dr}{r^2} \pm \frac{r'\,dx - (h+x)\,dr'}{r'^2} = 0;$$

en différenciant les valeurs de r, r', on a d'ailleurs

$$dr = \frac{-(h-x)\,dx + y\,dy}{r},\ dr' = \frac{(h+x)\,dx + y\,dy}{r'}.$$

En faisant les substitutions dans l'équation précédente, et en la multipliant par $-\frac{r^3 r'^3}{y}$ on trouve : $r'^3(y\,dx+(h-x)\,dy)\pm r^3((h+x)\,dy-y\,dx)=0$;

et la valeur qu'on en tire pour $\frac{dy}{dx}$ ou tang. g, est

$$\text{tang. } g=\frac{-r'^3 y\pm r^3 y}{r'^3(h-x)\pm r^3(h+x)}.$$

La tangente à la courbe coïncidant avec la direction de la résultante des actions de A et B sur A, si on nomme F cette dernière, et X, Y, ses composantes suivant les axes, on aura

$$X=F\cos. g,\ Y=F\sin. g,\ \text{d'où tang. } g=\frac{Y}{X}.$$

Soit R l'intensité de l'action répulsive exercée entre les pôles de même nom A et A'; R' celle de l'action répulsive ou attractive exercée entre B et A'. La première, faisant avec l'axe des x positives un angle de $180^\circ-i$, aura suivant les axes des x et des y des composantes $R\cos.(180^\circ-i)$, ou $-R\cos. i$, et $R\sin. i$, ou, enfin $-R\frac{h-x}{r}$ et $R\frac{y}{r}$, en remarquant que $\frac{y}{r}=\sin. i$. Les composantes de R', agissant comme les précédentes du côté des coordonnées positives, se trouveront de même et seront $\pm R'\frac{h+x}{r'}$ et $\pm R'\frac{y}{r'}$, en prenant, comme on l'a fait jusqu'ici, les signes supérieurs ou inférieurs suivant que B est de nom contraire à A ou de même nom, ou suivant que R' représente une attraction ou une répulsion. Les composantes de l'action totale exercée sur A' seront donc :

$$X=-R\frac{h-x}{r}\mp R'\frac{h+x}{r'};\ Y=R'\frac{y}{r}\mp R'\frac{y}{r'};$$

d'où l'on tire,

$$\text{tang. } g=\frac{Y}{X}=-\frac{y(Rr'\mp R'r)}{Rr'(h-x)\pm Rr(h+x)}.$$

En égalant cette valeur à celle qu'on avait trouvée,

$$\text{tang. } g=-\frac{y(r'^3\mp r^3)}{r'^3(h-x)\pm r^3(h+x)};$$

il en résulte la relation :

$$(Rr'\mp R'r)\{r'^3(h-x)\pm r^3(h+x)\}-(Rr'(h-x)\pm R'r(h\pm x)(r'^3\mp r^3)=0;)$$

en développant les calculs et séparant les termes qui contiennent $h-x$ et $h+x$, il vient

$$(\mp R'rr^3\pm Rr^3r')(h-x)\pm(Rr'r^3-R'rr'^3)(h+x)=0;$$

ou, réduisant et divisant par $\pm 2hrr'$,

$$Rr^2=R'r'^2.$$

Cette équation, où R et R' représentent des fonctions de r et r' respectivement, a lieu en tous les points de chaque courbe magnétique, et comme

on en peut faire passer une par tout point de l'espace, elle a lieu pour un point quelconque, r et r' désignant ses distances à A et B; on pourra donc y faire varier r arbitrairement en laissant à r' une valeur constante; désignant par H la valeur indépendante de r que prend alors $R'^2\,r'^2$, on aura, quel que soit r, $Rr^2 = H$; d'où

$$R = \frac{H}{r^2}.$$

Par conséquent l'intensité R de l'action mutuelle des pôles A, A', varie en raison inverse du carré de leur distance r.

NOTE E (p. 212)

RELATIVE A LA LOI DE L'ACTION D'UN ÉLÉMENT D'UN COURANT ÉLECTRIQUE SUR L'AIGUILLE AIMANTÉE.

L'expérience démontre que l'intensité de l'action exercée par un courant rectiligne indéfini sur une aiguille aimantée est en raison inverse de la distance de l'aiguille au courant. Nous avons dit que la conséquence de cette loi expérimentale est que l'action élémentaire d'un simple élément, soit d'une section du courant, est en raison inverse, non pas de la simple distance, mais du carré de la distance.

Soit en effet (fig. 178.) M N le courant indéfini; soit A le centre d'oscillation, c'est-à-dire le milieu de l'aiguille aimantée, point sur lequel on peut regarder l'action du courant comme étant concentrée; soit A B, ou c la plus courte distance de l'aiguille au courant; soit enfin A C, la distance d'un élément quelconque du courant à l'aiguille. L'action de l'élément C, en supposant la loi de l'inverse du carré, sera exprimée par $\frac{h\,ds}{AC^2}$, en appelant h une constante dépendante de la force mutuelle du courant et de l'aiguille, et ds l'élément rectiligne du courant dont on envisage l'action. Mais $AC^2 = CB^2 + BA^2 = s^2 + c^2$, en appelant s la distance CB du point C quelconque au point B fixe; la quantité s est une variable, puisque la forme de l'expression qui donne la valeur de l'action est la même, quel que soit le point du courant qu'on prenne.

Fig. 178.

Il n'y a donc qu'à intégrer cette expression $\frac{h\,ds}{s^2+c^2}$ entre $\frac{1}{0}$ et $-\frac{1}{0}$ pour avoir la valeur de l'action totale du courant indéfini MN, puisque nous supposons qu'il s'étend indéfiniment en partant de B dans les deux sens.

Or, l'intégrale de l'expression $h\int\frac{ds}{s^2+c^2}$ est $\frac{h}{c}$ arc tang. $= \frac{s}{c} +$ const.; prenant l'intégrale définie entre les limites $\frac{1}{0}$ et $-\frac{1}{0}$, on trouve que l'expres

sion devient $\frac{h\pi}{c}$; quantité dans laquelle h et π sont constantes et où c seul, c'est-à-dire la distance de l'aiguille au courant, peut varier. L'action d'un courant rectiligne indéfini sur une aiguille aimantée se trouve donc bien être inverse de la simple distance de ce courant à l'aiguille, quand on suppose que l'action d'un simple élément du courant est en raison inverse du carré de cette distance

Le calcul démontre également que si le courant, au lieu d'être rectiligne, est angulaire, et qu'on admette que l'action exercée par un élément de ce courant sur une particule magnétique, varie non-seulement en raison inverse du carré de la distance, mais aussi proportionnellement au sinus de l'angle que fait avec la direction du courant la ligne qui joint les centres de l'élément et de la particule, on parvient à trouver que l'action totale du courant est non-seulement, comme nous venons de le voir, inverse de la simple distance, mais aussi proportionnelle à la tangente de la moitié de l'angle que forme le courant devenu indéfini. Cette seconde conséquence du calcul a été vérifiée comme la première par une expérience de M. Biot. Nous ne reproduirons pas ici ce dernier calcul, dans lequel on suit du reste la même marche que pour le premier.

NOTE F (p. 266)

RELATIVE AU CALCUL DE L'ACTION MUTUELLE DE DEUX COURANTS ÉLECTRIQUES.

Le développement assez considérable que j'ai donné à cette note tient au désir que j'ai de faire connaître d'une manière un peu complète, en essayant de la mettre à la portée de la généralité des lecteurs, l'admirable théorie mathématique sur laquelle Ampère a fondé l'explication de tous les phénomènes électro-dynamiques; théorie tellement parfaite, que le célèbre physicien à qui on la doit pouvait prédire par son moyen, jusque dans leurs moindres détails, les phénomènes divers qui s'y rapportent, sans que jamais l'expérience vînt plus tard lui donner un démenti.

Dès l'origine des phénomènes électro-dynamiques, on mit en avant trois hypothèses pour les expliquer.

La première consistait à admettre que le courant électrique imprime aux conducteurs qu'il traverse une polarité magnétique transversale, de sorte qu'on peut assimiler l'effet du courant à celui d'une multitude de petits aimants très-courts, perpendiculaires à sa direction, et par conséquent parallèles entre eux; cette hypothèse rendait compte des premiers effets observés, et notamment de la loi découverte par MM. Biot et Savart, relativement à l'action mutuelle d'un élément de courant et d'une molécule magnétique; loi que nous avons vu, dans la note E, découler de l'expérience faite avec un courant d'une très-grande longueur, et un aimant très-court qu'on en rapproche plus ou moins. L'action mutuelle des élé-

ments magnétiques aurait été dans cette hypothèse l'action élémentaire.

La seconde hypothèse, proposée par M. Ampère, consiste à regarder comme élémentaire l'action mutuelle de deux courants, et à rendre compte de l'action mutuelle des courants et des aimants, et des aimants les uns sur les autres, en considérant un aimant comme un assemblage de courants électriques tournant autour de ses particules, et agissant soit sur les courants électriques d'un autre aimant, soit sur ceux d'un fil conducteur, précisément comme l'expérience a prouvé que les courants des fils conducteurs agissent les uns sur les autres.

Enfin, la troisième hypothèse consiste à supposer qu'il existe entre un élément de fil conducteur traversé par un courant et une molécule magnétique, une action élémentaire primitive, tendant à faire tourner à la fois la molécule autour de l'élément, et l'élément autour de la molécule. Cette dernière hypothèse diffère des deux autres en ce qu'au lieu de n'admettre, entre les points matériels qui agissent les uns sur les autres, que des forces dirigées suivant les droites qui les joignent, elle suppose entre l'élément du courant et la molécule magnétique une action représentée par deux forces égales et opposées, mais toutes deux perpendiculaires au plan qui passe par l'élément et par la molécule magnétique, appliquées l'une au milieu de l'élément, l'autre à la molécule, et formant ainsi ce que M. Poinsot a appelé un couple; en sorte que, lors même que l'élément et la molécule seraient liés ensemble invariablement, l'assemblage solide qu'ils formeraient prendrait par leur seule action mutuelle un mouvement de rotation. L'expérience n'a point vérifié cette conséquence qui était décisive, car elle était inconciliable avec les deux premières hypothèses; on devait s'y attendre, car regarder comme action primitive une action révolutive, paraissait contraire aux premiers principes de la dynamique, d'après lesquels l'action mutuelle des diverses parties d'un système solide ne peut jamais lui imprimer aucun mouvement. Remarquons, toutefois, que la première expérience d'Œrsted, jointe aux phénomènes de rotation continue découverts par Faraday, semblaient indiquer en effet comme action primitive une action révolutive dont l'attraction et la répulsion, qui alors auraient été seulement apparentes, n'étaient plus qu'une transformation occasionnée par le mode de disposition des appareils. Cette idée fut dans l'origine émise par les deux physiciens que je viens de nommer, mais abandonnée plus tard à la suite des nouvelles recherches de M. Ampère.

On ne doit pas s'étonner de la diversité de vues qui régna entre les savants, à la naissance de l'électro-dynamique, sur la nature de la nouvelle force dont les découvertes successives d'Œrsted, d'Arago, d'Ampère et de Faraday avaient enrichi la physique. En effet, l'action mutuelle des courants découverte par Ampère était le premier exemple que la nature nous offrît de forces dont l'action s'exerce dans un sens perpendiculaire à leur direction, et non dans le sens même de cette direction et pour lesquelles, par conséquent, l'intensité de l'action n'était pas simplement une

fonction de la distance mutuelle des particules agissantes, mais dépendait aussi de cet élément variable que nous avons appelé *sens* du courant.

Aussi, beaucoup de physiciens s'étaient-ils attachés d'abord de préférence à la première hypothèse, dans laquelle les courants n'étaient plus la force primitive, mais étaient la cause qui, en déterminant dans les conducteurs un magnétisme transversal, développaient la force dont le sens se trouvait bien ainsi le même que celui de l'action à laquelle elles donnaient naissance. Toutefois, la supposition de cette polarité transversale ne put pas longtemps soutenir l'examen; elle devenait très-compliquée dès qu'on la serrait de près pour expliquer l'action mutuelle des courants électriques, et elle était inconciliable avec les phénomènes de rotation continue. Force donc fut de revenir à la seconde, celle de M. Ampère, qui est maintenant généralement adoptée, et que les nouvelles découvertes semblent toujours plus confirmer.

M. Ampère n'avait pas tardé à appliquer ses hautes connaissances mathématiques au calcul des forces dont il avait trouvé par la voie de l'expérience les curieux effets. Il commença par exprimer au moyen d'une formule la valeur de la force attractive ou répulsive de deux éléments ou portions infiniment petites de courants, afin de pouvoir en déduire, par les méthodes connues d'intégration, l'action qui a lieu entre deux portions de conducteurs données de forme et de situation. Comme il est impossible de soumettre directement à l'expérience des portions infiniment petites de courant, il faut nécessairement partir d'observations faites sur des courants de grandeur finie et satisfaisant à deux conditions, savoir : que les observations soient susceptibles d'une grande précision, et de plus, qu'elles soient propres à déterminer la valeur de l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de ces courants. On peut obtenir ce résultat de deux manières.

La première consiste à mesurer avec la plus grande exactitude les valeurs de l'action mutuelle de deux portions du courant d'une grandeur finie, en les plaçant successivement l'une par rapport à l'autre à différentes distances et en différentes positions, car il est évident que l'action ne dépend pas seulement de la distance; puis, faisant une hypothèse sur la valeur de l'action mutuelle de deux portions infiniment petites, on en conclut celle de l'action qui doit en résulter pour les conducteurs de grandeur finie sur lesquels on a opéré, et l'on modifie l'hypothèse jusqu'à ce que les résultats du calcul s'accordent avec ceux de l'observation. C'est ainsi que nous avons fait dans la note E pour déterminer la loi qui régit l'action mutuelle d'un élément de courant et d'une molécule magnétique. Mais cette méthode, bonne dans ce cas, ne pouvait convenir dans celui où il s'agit de l'action mutuelle de deux courants, vu les difficultés d'exécution et de calcul qu'il présente.

La seconde manière, qui est celle dont M. Ampère a fait usage, consiste à constater divers cas d'équilibre dans l'action mutuelle des courants les

uns sur les autres; ces divers cas d'équilibre donnent immédiatement autant de lois qui conduisent directement à l'expression mathématique de la force que deux éléments de courants électriques exercent l'un sur l'autre, d'abord en faisant connaître la forme de cette expression, ensuite en déterminant les nombres constants, mais d'abord inconnus qu'elle renferme, précisément comme les lois de Kepler démontrent d'abord que la force qui retient les planètes dans leurs orbites tend constamment au centre du soleil, puisqu'elle change pour une même planète en raison inverse du carré de sa distance à ce centre, enfin, que le coefficient constant qui en représente l'intensité a la même valeur pour toutes les planètes.

Nous avons vu que ces cas d'équilibre sont au nombre de quatre (p. 261, 262, 263, 264 et 265). Les deux premiers furent constatés par M. Ampère dès l'époque de ses premières recherches, c'est-à-dire déjà en 1820; ce sont eux qui lui permirent de trouver la forme de l'expression mathématique; il fut conduit à établir plus tard successivement les deux autres cas, afin de pouvoir déterminer les coefficients constants qui entraient dans sa formule, sans avoir recours, comme il l'avait déjà fait, aux expériences dans lesquelles, au lieu de deux courants, ce sont un aimant et un courant qui agissent l'un sur l'autre. Il se contenta longtemps du troisième cas qui lui donnait une relation entre les deux constantes qui entraient dans sa formule, et il établissait leur valeur absolue par l'analogie de ce qui a lieu dans la nature. M. Savary, voulant se passer de cette hypothèse, était parvenu, en 1823, à la même valeur pour ces deux constantes au moyen d'une observation faite sur des aimants, combinée avec le troisième cas d'équilibre. C'est alors que M. Ampère, voulant que sa théorie reposât sur des bases plus solides encore, chercha et réussit à déterminer directement cette valeur des deux constantes, en ajoutant le quatrième cas d'équilibre au troisième qu'il avait déjà trouvé. — Voyons maintenant comment il établit sa formule.

Soit i et i' les rapports d'intensités des deux courants donnés à l'intensité du courant pris pour unité, ds et ds' les longueurs des éléments qu'on considère dans chacun d'eux; ids et $i'ds'$ exprimeront les intensités respectives de ces éléments, et $ids \times i'ds'$ ou $ii'dsds'$ leur action mutuelle, quand ils seront perpendiculaires à la ligne qui joint leurs milieux, par conséquent parallèles entre eux et situés à l'unité de distance l'un de l'autre; on aura soin de prendre ce produit avec le signe + quand les deux courants, allant dans le même sens, s'attireront, avec le signe —, dans le cas contraire.

Maintenant, considérant deux éléments de courants placés d'une manière quelconque et par conséquent non dans le même plan, leur action mutuelle dépendra évidemment de leurs longueurs, des intensités des courants dont ils font partie et de leur position respective. Cette position se détermine au moyen de la longueur r de la droite qui joint leurs milieux des angles θ et θ' que font avec un même prolongement de cette

droite les directions de deux éléments, pris dans le sens de leurs courants respectifs, et enfin de l'angle ω, que font entre eux les plans menés par chacune de ses directions et par la droite qui joint les milieux des éléments. On peut, par analogie avec ce qui se passe dans la nature, dans tous les phénomènes d'attraction et de répulsion, admettre que la force dont on cherche l'expression agit aussi en raison inverse d'une certaine puissance de la distance que nous appellerons la n^{me}, n étant une constante à déterminer. Alors, en représentant par ρ la fonction inconnue des angles θ θ' et ω, dans la valeur de l'action, on obtient $\rho\, i\, i'\, ds\, ds'$ pour l'expression générale de l'action de deux éléments ds et ds' de deux courants ayant pour intensité i et i', à l'unité de distance.

Il faut maintenant déterminer la fonction ρ. On considère d'abord pour cela deux éléments (fig. 179.) ad et $a'd'$, parallèles entre eux, situés à une distance r l'un de l'autre; leur action est exprimée par $\frac{i\, i'\, ds\, ds'}{r^n}$, ainsi que nous l'avons vu. Supposons que ad restant fixe, $a'd'$ soit transporté parallèlement à lui-même, de manière que son milieu soit toujours à la même distance de celui de ad; comme l'angle ω est nul, puisque les directions des deux courants sont dans le même plan, la valeur de l'action mutuelle de leurs deux éléments est une fonction particulière des angles θ et θ', que nous désignons par φ, et doit être exprimée par la formule $\frac{i\, i'\, ds\, ds'\, \varphi(\theta\theta')}{r^n}$. Appelons k la quantité constante à laquelle se réduit $\varphi(\theta, \theta')$ quand $a\, d$ est en $a''\, d'''$ dans le prolongement de ad et dirigé dans le même sens, nous voyons que k exprime le rapport qui existe entre l'action de ad sur $a'''\, d'''$, qui est donc $\frac{k\, i\, i'\, ds\, ds'}{r^n}$; et celle de ad sur $a'd'$ qui est $\frac{i\, i'\, ds\, ds'}{r^n}$; ce rapport est indépendant de la distance r, des intensités i et i' et de la longueur ds et ds' des éléments qu'on considère. Les deux cas particuliers dont il s'agit sont relatifs, l'un, celui de l'action de ad sur $a'd'$, à l'action de deux courants parallèles qui s'attirent ou se repoussent suivant qu'ils vont dans le même sens ou dans des sens contraires, et celui de l'action de ad sur a''' et d''', à la répulsion de deux courants dirigés dans le même sens suivant une même ligne droite, ou, ce qui revient au même, de deux parties consécutives d'un même courant rectiligne.

Fig. 179.

Servons-nous maintenant, pour trouver la forme générale de la fonction ρ, de nos deux premiers cas d'équilibre, et en particulier du second, qui nous montre que l'attraction d'un élément rectiligne infiniment petit est la même que celle d'un autre élément sinueux quelconque terminé aux deux extrémités du premier, ce qui nous permet d'appliquer au nouveau genre de



forces, du moins quand on les considère dans leurs éléments, les lois de la décomposition des forces démontrées en mécanique pour celles qui agissent dans le sens même de leur direction, mais qu'on n'aurait pas pu appliquer aux autres sans une démonstration expérimentale de cette possibilité. Nous avons encore besoin du principe évident de lui-même, qu'une portion infiniment petite de courant électrique n'exerce aucune action sur une autre portion infiniment petite d'un courant situé dans un plan qui passe par son milieu, et qui est perpendiculaire à sa direction.

Soient maintenant (fig. 180.) $Mm = ds$, et $M'm' = ds'$, deux éléments de

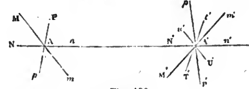


Fig. 180.

courants électriques dont les milieux sont en A et en A'; faisons passer un plan MA'm par la droite AA' qui les joint et par l'élément Mm; de même faisons passer un plan M'Am' par l'élément M'm' et par la droite AA'. Le courant dirigé suivant Mm, soit ids, pourra être remplacé par ses deux composantes Nn ou $ids \cos. \theta$, suivant la droite AA', et Pp ou $ids \sin. \theta$, suivant une perpendiculaire élevée en A à AA' dans le plan MA'm. Le courant M'm' ou $i'ds'$ pourra être remplacé de même par ses deux composantes N'n' ou $i'ds' \cos. \theta'$, suivant AA', et P'p' ou $i'ds' \sin. \theta'$, suivant une perpendiculaire en A' à AA' dans le plan M'Am'. Enfin, la composante $i'ds \sin. \theta'$ pourra elle-même être remplacée par $i ds' \sin. \theta \cos \omega$, dirigée dans le même plan MA'm, suivant T't' et par $i ds \sin. \theta' \sin. \omega$, dirigée suivant une droite U'u' menée en A perpendiculairement au plan MA'm. Toutes ces décompositions peuvent s'effectuer en vertu du second cas d'équilibre, qui permet d'appliquer aux forces qui nous occupent les lois générales de la décomposition. L'action mutuelle des deux éléments ids et $i'ds$ de courant, représentés par Mm et M'm', peut donc être remplacée par celle des *cinq* éléments de courant que nous venons de trouver.

Voyons maintenant à quoi peut être ramenée l'action mutuelle de ces cinq éléments :

Commençons par les énumérer en les rapportant à la fig. 180.

Nn ou $ids \cos. \theta$ dirigée suivant AA';

Pp ou $ids \sin. \theta$ perpendiculaire en A à AA', dans le plan MA'm;

N'n' ou $i'ds' \cos. \theta'$, dans le plan M'Am', suivant AA';

T't' ou $ids \sin. \theta' \cos. \omega$, dans le plan MA'm passant en A' perpendiculaire à AA';

U'u' ou $i'ds' \cos. \theta' \cos. \omega$, perpendiculaire au plan MAm en A'.

Ces courants, situés les uns par rapport aux autres, soit dans les mêmes plans, soit dans des plans différents, ont tous leurs milieux les uns en A,

les autres en A'. Pour calculer l'action mutuelle de ces cinq éléments, il faut se rappeler qu'elle se réduit à celle de Nn et de Pp, qui remplacent l'action de Mm sur T$'t'$ et U$'u'$ qui remplace M$'m'$. Il est clair que Nn et Pp, composantes du même courant, n'agissent pas l'une sur l'autre ; il en est de même de N$'n'$, T$'t'$ et U$'u'$, qui sont les trois composantes de M$'m'$. L'action de U$'u'$, soit $i'ds'$ cos. θ' cos. ω sur Nn et sur Pp est nulle, parce que Uu' a son milieu en A' dans le plan MA$'m$ auquel il est perpendiculaire, et que Nn et Pp sont dans ce plan, le premier dans la direction AA' de la ligne qui joint son milieu avec celui de U$'u'$, l'autre dans une direction perpendiculaire à cette même droite ; il en sera de même de l'action de T$'t'$ sur Nn, car la direction de T$'t'$ est perpendiculaire à celle prolongée de Nn, sur laquelle son milieu est situé. L'action de Pp sur N$'n'$ est également nulle par la même raison. Ces nullités d'action sont une conséquence du principe que nous avons rappelé plus haut.

Il ne reste plus que l'action mutuelle de Pp, soit ids sin. θ, de T$'t'$ soit $i'ds'$ sin. θ' cos ω, de Nn soit ids cos. θ' et de N$'n'$ soit $i'ds'$ cos. θ'. L'action des deux éléments donnés Mn et M$'n'$ se réduit donc à la réunion de ces deux actions restantes, et comme elles sont toutes deux dirigées suivant la droite AA' qui joint les milieux des portions du courant entre lesquelles elles s'exercent, il suffit de les ajouter pour avoir l'expression cherchée de l'action mutuelle des deux courants donnés.

Pp et T$'t'$ sont dans un même plan et en même temps tous deux perpendiculaires à AA', et par conséquent parallèles ; d'après ce que nous avons vu au commencement de cette note, leur action mutuelle sera, en prenant pour les éléments de courant leurs valeurs respectives, et en appelant r la distance AA' qui les sépare : $\frac{ii'dsds' \sin.\theta \sin.\theta \cos.\omega}{r^n}$. N$n$ et et N$'n'$ sont non-seulement dans un même plan, mais sur une même ligne droite, c'est-à-dire que la direction de l'un est sur le prolongement de la direction de l'autre. Cette dernière circonstance fait, comme nous l'avons vu également au commencement de cette note, qu'il faut multiplier par k la formule qui donnerait l'expression générale de leur action mutuelle, dans le cas où ils seraient parallèles, expression qui devient ainsi : $\frac{kii'dsds' \cos.\theta \cos.\theta'}{r^n}$. L'action totale des deux éléments Mn et Mn ou ids et ids', l'un sur l'autre a donc pour expression :

$$\frac{ii'dsds'}{r^n}(\sin.\theta \sin.\theta' \cos.\omega + k \cos.\theta \cos.\theta').$$

La forme de l'expression générale de l'action mutuelle de deux éléments de courant étant trouvée, il reste à déterminer la valeur des deux constantes n et k ; c'est ce que fait M. Ampère en se servant pour cela du troisième et du quatrième cas d'équilibre. Il avait d'abord fait usage du troisième cas seulement, et intégrant l'expression différentielle que nous venons de trouver, il avait calculé le moment total de la rotation que

les actions des différentes parties d'un circuit fermé tendent à imprimer à une portion de courant circulaire, moment qui, d'après le troisième cas d'équilibre, doit être égal à zéro[1]. Cette égalité le conduisit à une première équation de condition entre les constantes n et k, savoir : $n+2k-1=0$. Nous ne suivrons pas M. Ampère dans les calculs difficiles et longs au moyen desquels il parvient à cette équation; ce serait sortir des limites que nous nous sommes imposées; nous ajouterons seulement que, par des calculs non moins relevés, il arrive à trouver l'expression de l'action mutuelle de deux circuits, d'une longueur finie, situés dans un même plan, en considérant leurs aires λ et λ' comme partagées en éléments infiniment petits dans tous les sens, et supposant que ces éléments agissent l'un sur l'autre suivant la droite qui les joint, en raison directe de leurs surfaces et en raison inverse de la puissance $n+2$ de leur distance. L'expression[2] est $\frac{n(n-1)}{2}\ \frac{ii\lambda\lambda}{2^n+2}$. Maintenant, si l'on considère deux systèmes semblables, composés chacun de deux circuits fermés et plans, les éléments semblables de leurs aires seront proportionnels aux carrés des lignes homologues, et les distances de ces éléments seront proportionnelles aux premières puissances de ces mêmes lignes. Appelons m le rapport des lignes homologues des deux systèmes, l'action des deux éléments du premier étant représentée toujours par la formule que nous venons de poser,

[1] L'expérience qui établit ce troisième cas d'équilibre (*fig.* 100, *p.* 264) est peu susceptible de précision à cause du frottement de l'arc mobile sur le mercure contenu dans les deux augets; aussi M. Ampère avait dans l'origine déduit la valeur de k d'une autre expérience qui ne présentait pas les mêmes inconvénients; elle consistait à constater qu'une portion mobile de fil conducteur dont les deux extrémités se trouvent dans l'axe vertical autour duquel elle tourne librement ne peut se mouvoir autour de cet axe par l'action d'un conducteur circulaire horizontal dont le centre est dans le même axe. Il est évident que le conducteur est beaucoup plus mobile dans ce mode d'opérer que dans l'autre; mais M. Ampère l'avait abandonné parce que le calcul dont il s'était servi pour en déduire la valeur de k supposait établi relativement à chacun des éléments du conducteur circulaire, ce que l'expérience démontrait seulement pour la totalité de ce conducteur.

[2] M. Plana a trouvé, en reprenant les calculs de M. Ampère, que cette expression est erronée et doit être remplacée par $\frac{n^2-1}{2}\left(\frac{i\,i'\,\lambda\lambda'}{r^n+2}\right)$; mais comme la même rectification doit être apportée à l'expression suivante, il n'en résulte aucun changement dans la valeur de leur rapport, qui est la seule chose qui importe pour la détermination de k et de n dont il s'agit ici. L'erreur de M. Ampère n'a donc aucune importance pour l'objet qui nous occupe; elle en a davantage pour les cas où l'on a besoin d'exprimer la force absolue, sans toutefois que même alors il en résulte, ainsi que M. Plana l'a reconnu, aucun changement dans les résultats généraux obtenus par M. Ampère.

celle des deux éléments du second deviendra $n\left(\frac{n-1}{2}\right)\frac{ii'\lambda\lambda' m^4}{r^{n+2}m^{n+2}}$. En effet, il faut, d'après la remarque que nous venons de faire, multiplier par le carré du nombre qui exprime le rapport des lignes homologues, c'est-à-dire par m^2, l'expression qui représente l'action individuelle de chacun des éléments du premier système, pour avoir celle qui représente l'action de chacun des éléments du second; ce qui fait que le produit des expressions des deux éléments du second système, qui donne leur action mutuelle, se trouve être le produit par m^4 de l'expression de l'action mutuelle des deux éléments du premier. Quant au terme r^{n+2} de cette dernière expression, il faut, pour passer à celle du second système, le multiplier par m^{n+2}, puisque m exprime encore le rapport qui existe entre les distances respectives des éléments de chacun des deux systèmes; de telle façon que si l'on appelle r, cette distance pour le second, on a $r'=rm$, r étant la distance pour le premier; d'où il suit que $r'^{n+2}=r^{n+2}m^{n+2}$.

Maintenant le quatrième cas d'équilibre (*fig.* 119, p. 265) prouve que l'action du second système doit être égale à celle du premier, car dans l'expérience qui l'établit, le plus grand cercle et le cercle moyen forment un système semblable à celui du cercle moyen et du petit; le cercle moyen qui est mobile demeure en équilibre entre les deux cercles extrêmes qui sont fixes, quand la circonférence de tous les trois est parcourue par le même courant électrique. Or, le rapport qui existe entre les expressions de ces deux actions est $\frac{m^4}{m^{n+2}}$ ou m^{2-n}; et puisqu'elles sont égales, ce rapport doit être égal à l'unité ou à m^0, ce qui donne $n=2$, et en vertu de l'équation $1-n-2k=0$, $k=-\frac{1}{2}$.

L'expression générale de l'action mutuelle de deux éléments de courants quelconques, situés dans des plans quelconques, devient ainsi, en mettant à la place de n et de k leurs valeurs respectives : $+2$ et $-\frac{1}{2}$:

$$\frac{ii'ds\,ds'}{r^2}(\sin.\theta\sin.\theta'\cos.\omega-\tfrac{1}{2}\cos.\theta\cos.\theta');$$

expression qui ne renferme plus que des quantités connues.

Remarquons en passant qu'il résulte de la formule $\frac{n(n-1)}{r}\frac{ii'\lambda\lambda'}{r^{n+2}}$ relative à l'action mutuelle de deux courants fermés, que cette expression n'étant plus fonction que de la distance, puisque, sauf r, toutes les quantités qui y entrent sont constantes, il ne peut jamais résulter de cette action un mouvement de rotation continue; cette conséquence importante est complétement confirmée par l'expérience, qui montre également qu'il est impossible de produire un mouvement de rotation continue par l'action mutuelle de deux aimants, qui sont l'un et l'autre des assemblages de courants fermés.

Nous avons vu dans la note E qu'on trouve également, en appliquant le calcul à une expérience de M. Biot, que l'action mutuelle d'un élément

de courant et d'une molécule magnétique est en raison inverse du carré de leur distance; mais ce résultat ne pouvait être étendu à l'action de deux éléments de courant, qu'en admettant que l'action des aimants est due à des courants électriques, tandis que la démonstration que M. Ampère en a donnée, en se basant sur des cas d'équilibre dans lesquels il y a uniquement en jeu des courants électriques, est indépendante de toutes les hypothèses qu'on pourrait faire sur la constitution des aimants.

Il n'en avait pas toujours été ainsi : M. Ampère s'était d'abord contenté de la première relation entre les deux constantes k et n, fondée sur ce qu'un conducteur mobile autour d'un axe auquel il se termine de part et d'autre n'éprouve, quelle que soit sa forme, aucune tendance à tourner toujours dans le même sens par l'action d'une portion de conducteur circulaire, dont le centre est dans l'axe de rotation et dont le plan est perpendiculaire à cet axe. Cette rotation, que M. Ampère a remplacée, comme nous l'avons vu, par le troisième cas d'équilibre, donne $n+2k-1=0$. D'après l'analogie entre les divers phénomènes d'attraction qui ont lieu dans la nature, et en particulier avec le résultat de l'expérience de M. Biot, de la note E que nous venons de rappeler, M. Ampère avait donc admis dans l'origine, sans démonstration directe, que l'exposant n devait être 2, ce qui donnait, commme on l'a vu, $k=-\frac{1}{2}$. Plus tard, M. Savary avait trouvé une seconde relation entre n et k au moyen d'une expérience de MM. Gay-Lussac et Walter, qui consiste en ce qu'un anneau d'acier aimanté n'exerce aucune action extérieure, quoique ses particules soient réellement douées d'aimantation, puisque ses propriétés magnétiques se manifestent dans ses diverses parties dès qu'on les brise. M. Ampère fit ensuite la même expérience en remplaçant l'anneau par un assemblage de courants circulaires disposés comme ceux qu'il admet autour des molécules de l'acier aimanté. En égalant à 0, conformément à l'expérience, l'action de ce système sur un point extérieur quelconque, M. Savary obtint entre n et k, indépendamment de toute assimilation entre les aimants et les courants électriques, une seconde relation $kn+1=0$, qui, combinée avec la première $n+2k-1$, donne l'équation $n^2-n-2=0$, d'où $n=\frac{1}{2}\pm\frac{3}{2}$. On trouve ainsi pour n deux valeurs, savoir, 2 et -1 qui correspondent pour k à $-\frac{1}{2}$ et à $+1$. On a donc à choisir entre les deux systèmes $(n=2, k=-\frac{1}{2})$ et $(n=-1$ et $k=1)$. Or, M. Ampère a montré par une expérience directe que k doit être négatif, car cette constante représente le rapport entre les actions de deux éléments de courants (fig. 179) quand, la distance restant la même, on les suppose d'abord dirigés suivant une même droite, puis tous deux dans un même plan et perpendiculaires à la droite qui les joint, c'est-à-dire parallèles; cette dernière action étant positive, c'est-à-dire attractive, l'autre est négative, c'est-à-dire répulsive, le sens relatif des courants restant le même, ce qui va sans dire; c'est ce qui résulte de l'expérience où l'on voit deux portions de courants dirigées suivant une même droite et dans le même sens, se repousser mutuelle-

ment (*fig.* 92, p. 225); ces deux mêmes portions de courant, transportées parallèlement l'une à l'autre, se trouveraient cheminer dans le même sens.

Nous ne suivrons pas M. Ampère dans l'application qu'il fait de sa formule à la détermination de toutes les circonstances du mouvement qu'un courant fixe rectiligne ou circulaire doit imprimer à un courant mobile, quand on connaît la relation de position des conducteurs qui transmettent ces courants. Nous avons déjà vu comment, au moyen de sa théorie, M. Ampère explique en particulier tous les phénomènes de rotation continue provenant de l'action mutuelle des courants, ainsi que tous les effets du magnétisme terrestre, en les ramenant à ceux d'un courant fixe indéfini. Les résultats du calcul appliqué à ce genre de considérations se trouvent parfaitement confirmés par ceux de l'expérience. Le point peut-être le plus difficile et le plus délicat est celui qui concerne l'assimilation des aimants à un assemblage de courants circulaires disposés d'une manière régulière et constituant les *solénoïdes*.

M. Savary, en 1823, avait cherché, dans un travail auquel nous avons déjà fait allusion, à calculer l'action de cet assemblage, et avait été amené à cette occasion à déterminer n et k, combinant la relation primitivement trouvée par M. Ampère, $n = 2k - 1 = 0$, l'autre, $kn + 1 = 0$; c'était avant que M. Ampère fût arrivé par la considération de son quatrième cas d'équilibre à la détermination directe de ces deux constantes. M. Savary avait ensuite trouvé en calculant l'effet de toutes les actions exercées sur un élément de courant placé à une assez grande distance, par une suite de courants circulaires et très-petits, dont les plans seraient perpendiculaires à une ligne droite ou courbe, que toutes ces actions se réduisaient à deux forces dirigées suivant les perpendiculaires à deux plans passant par l'élément et par l'extrémité des solénoïdes. Les intensités de ces forces sont en raison inverse des carrés des distances qui séparent l'élément des extrémités du cylindre électro-dynamique, et proportionnelles aux sinus des angles que les lignes qui mesurent ces distances font avec la direction de l'élément. Ces forces sont ainsi indépendantes de la forme de la courbe à laquelle les plans des courants circulaires sont perpendiculaires. Cette loi, que M. Savary avait déduite uniquement de la théorie des actions mutuelles des courants voltaïques, est la même que celle qui résulte des expériences de MM. Biot et Savart, pour exprimer l'action d'un aimant sur un élément de courant (note E). Il y a une seule différence, c'est que les centres d'action, qu'on peut substituer à tous les courants circulaires qui constituent le cylindre électro-dynamique, sont les extrémités mêmes du cylindre, tandis que les centres d'action ou pôles de l'aimant sont à de certaines distances de ses extrémités. En général, un solénoïde se conduit comme un aimant ayant le même axe; et en partant de loi élémentaire de l'action mutuelle de deux courants infiniment petits, le calcul conduit à des résultats conformes à l'expérience, quand on l'applique à l'action



d'un courant de force donnée sur un solénoïde et à l'action mutuelle de deux solénoïdes.

Dans son ouvrage intitulé : *Théorie des phénomènes électro-dynamiques*, M. Ampère a confirmé et généralisé les résultats obtenus par M. Savary sur les solénoïdes, et est parvenu par la considération des quatre cas d'équilibre à rendre compte de tous les phénomènes que présentent les aimants, en les considérant comme des assemblages de courants électriques formant de très-petits circuits autour de leurs particules. Il a montré en particulier que deux systèmes composés de très-petits solénoïdes agissent l'un sur l'autre, d'après sa formule, comme deux aimants composés d'autant d'éléments magnétiques que l'on peut supposer de solénoïdes dans ces deux systèmes; l'un de ces systèmes agit aussi sur un élément du courant électrique, comme le fait un aimant; par conséquent *toutes les explications, tous les calculs* fondés tant sur la considération des forces attractives et répulsives de ces molécules en raison inverse du carré des distances, que sur celle des forces révolutives entre une de ces molécules et un élément du courant électrique, sont nécessairement les mêmes, soit qu'on explique par des courants électriques les phénomènes que produisent les aimants dans ces deux cas, ou qu'on préfère l'hypothèse des deux fluides magnétiques. Ce n'est donc ni dans ces calculs, ni dans ces explications qu'on peut chercher les objections contre la théorie de M. Ampère ou les preuves en sa faveur. Ces preuves résultent surtout de ce qu'elle ramène à un même principe trois sortes d'actions que l'ensemble du phénomène prouve être dues à une cause commune, qui ne peuvent y être ramenées autrement; savoir : l'action mutuelle de deux courants, l'action mutuelle de deux aimants et l'action mutuelle d'un aimant et d'un courant. On avait cru d'abord pouvoir les expliquer tous par l'action mutuelle de deux aimants, en supposant, comme nous l'avons déjà dit, que le passage du courant électrique dans un conducteur y développe une polarité magnétique transversale, mais les phénomènes du mouvement de rotation continue sont en contradiction complète avec cette idée. Il faut donc, si l'on n'adopte pas la théorie de M. Ampère, regarder les trois genres d'action qu'il a ramenés à une loi commune, comme trois sortes de phénomènes absolument indépendants les uns des autres. En effet, on ne peut regarder l'action mutuelle des molécules magnétiques, s'il en existe, comme la force élémentaire, puisque étant proportionnelle à une fonction de la distance, elle ne peut jamais donner lieu au mouvement toujours accéléré dans le même sens que présentent les phénomènes de rotation. La force élémentaire peut encore moins être celle qui se manifeste entre un élément magnétique et un élément de courant, c'est-à-dire entre deux corps à la vérité d'un très-petit volume, mais dont l'un est nécessairement composé, quelle que soit celle des deux manières d'interpréter les phénomènes qu'on adopte. Mais si c'est l'action mutuelle des deux éléments du courant qu'on regarde comme la force élémentaire, alors

on peut rendre compte de tous les phénomènes, et l'action mutuelle soit de deux éléments magnétiques, soit d'un élément magnétique et d'un élément de courant, sont des actions composées, puisque l'élément magnétique doit être considéré dans ce cas comme composé. Remarquons que, quoiqu'il soit naturel, d'après l'ensemble des faits, de conjecturer que les trois sortes d'action dépendent d'une cause unique, c'est par le calcul seul, et sans rien préjuger sur la nature même de la force que deux éléments de courant exercent l'un sur l'autre, que M. Ampère l'a prouvé en cherchant, d'après les seules données de l'expérience, l'expression analytique de cette force, et en démontrant qu'on en déduit les valeurs des deux autres, telles qu'elles sont données aussi par l'expérience. Quant à la nature de la force élémentaire qu'exercent l'une sur l'autre deux portions de conducteurs dans lesquels les fluides électriques sont en mouvement, ses effets sont si différents de ceux qui se manifestent quand les deux fluides sont en repos dans des corps chargés d'électricité statique, qu'on a été jusqu'à prétendre que les premiers ne devaient pas être attribués aux mêmes fluides que les seconds. C'est précisément comme si l'on concluait de ce que la suspension du mercure dans le baromètre est un phénomène extrêmement différent de celui du son, qu'on ne doit pas les attribuer au même fluide atmosphérique en repos dans le premier cas et en mouvement dans le second, mais bien à deux fluides différents, l'un pressant la surface du mercure, l'autre transmettant les mouvements vibratoires qui produisent le son.

Cependant rien ne prouve que la force exprimée par la formule de M. Ampère ne puisse pas résulter des attractions et des répulsions des deux fluides électriques, en raison inverse des carrés des distances sur ces molécules. Seulement il ne faut pas supposer que ces molécules soient distribuées sur les fils conducteurs, de manière à y demeurer fixées et à pouvoir par conséquent être regardées comme invariablement liées entre elles. En effet, il résulte du principe de la conservation des forces vives, qui est une conséquence nécessaire des lois mêmes du mouvement, que quand les forces élémentaires sont exprimées par de simples fonctions des distances mutuelles des points entre lesquelles elles s'exercent, et qu'une partie de ces points sont invariablement liés entre eux et ne se meuvent qu'en vertu de ces forces, les autres restant fixes, les premiers ne peuvent revenir à la même situation, par rapport aux seconds, avec des vitesses plus grandes que celles qu'ils avaient quand ils sont partis de cette même situation. Or, dans le mouvement de rotation continue imprimé à un conducteur mobile par l'action d'un conducteur fixe, tous les points du premier reviennent à la même situation avec des vitesses de plus en plus grandes à chaque révolution, jusqu'à ce que les frottements et la résistance du mercure ou de l'eau acidulée, où plonge l'extrémité du conducteur, mettent un terme à l'augmentation de la vitesse de rotation de ce conducteur; elle devient alors constante malgré ces frottements et cette résistance.

On devra donc conclure de ce qui précède que ces phénomènes sont dus à ce que les deux fluides électriques parcourent continuellement les fils conducteurs d'un mouvement extrêmement rapide, en se réunissant et se séparant alternativement dans les intervalles des particules de ces fils. Dès qu'on suppose que mises en mouvement dans les fils conducteurs par l'action de pile ou de toute autre source d'électricité, les molécules électriques changent continuellement de lieu comme nous venons de l'exposer, il n'est pas contradictoire d'admettre que des actions en raison inverse des carrés des distances exercées par chaque molécule, il puisse résulter entre deux éléments de fils conducteurs une force qui dépende non-seulement de leur distance, mais encore des directions suivant lesquelles les molécules électriques se meuvent, se réunissant à des molécules de l'espèce opposée pour recomposer du fluide neutre, et s'en séparant à l'instant suivant pour aller s'unir à d'autres. Or, c'est précisément et uniquement de cette distance et de ces directions que dépend la force qui se développe alors, et dont les expériences et les calculs de M. Ampère lui ont donné la valeur. Nous verrons dans la quatrième partie de ce traité les idées qu'on peut se faire sur le genre de mouvement dont il s'agit, en d'autres termes, sur le mode de propagation de l'électricité dynamique. Ce qu'il importait ici, c'était de constater, indépendamment de toute hypothèse sur sa nature, l'existence nécessaire de ce mouvement pour rendre compte des phénomènes désignés sous le nom d'*électro-dynamiques* par M. Ampère, qui le premier a établi ce principe important dont on ne se faisait aucune idée avant lui.

C'est en novembre 1826, ainsi que nous l'avons déjà dit, qu'Ampère publia une exposition complète de sa théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques, résumant et complétant dans cet ouvrage les recherches curieuses qu'il avait faites lui-même sur ce sujet depuis 1820, et auxquelles M. Savary et M. de Montferrant avaient ajouté quelques développements importants. Dès lors on s'est peu occupé de cette branche de l'électricité où il semblait qu'il ne restait rien à faire. Cependant, deux savants allemands, MM. Weber et Neumann, y sont revenus à l'occasion des courants d'induction, le premier essentiellement sous le point de vue expérimental, le second exclusivement sous le rapport mathématique. J'ai déjà fait allusion à leurs travaux p. 268 et dans le chapitre de l'*Induction*; je me bornerai à remarquer ici que ces travaux ne changent rien aux bases fondamentales de la théorie de M. Ampère. Il en est de même des recherches récentes et non encore publiées de M. Cellerier, que ce jeune savant a communiquées à l'Académie des Sciences de Paris, le 3 juin 1850 (*Comptes rendus de l'Ac. des Sciences de Paris, du 3 juin* 1850, *et Arch. des Scien. Phy., Bibl. Univ.* XIV, p. 211), et dont le but est d'établir les formules et les lois d'Ampère, abstraction faite de toute hypothèse préalable sur la forme même à donner à l'expression de l'action des forces en jeu; travail devenu nécessaire pour mettre ces résultats importants à l'abri des

ébranlements qu'ils pouvaient éprouver par l'effet des changements apportés par les progrès de la science dans les idées qu'on se forme de la nature même de l'électricité. Dans l'ignorance où nous sommes de la manière dont les actions électro-dynamiques résultent des propriétés des fluides électriques, ou sont influencées par le milieu ambiant, il se peut, en effet, que la forme assez simple supposée à l'action de deux éléments, qu'on n'a pas pu vérifier directement par l'expérience, ne soit pas exacte, et que cette action se compose de plusieurs forces distinctes et n'ait pas une résultante dirigée suivant la droite qui joint les deux éléments. Pour connaître exactement sa forme et sa valeur, on doit donc la faire consister en un système de forces entièrement arbitraire qui puisse même n'avoir pas de résultante, et dont les composantes et les moments soient des fonctions inconnues des quantités qui déterminent la position relative des éléments. C'est la marche qu'a suivie M. Cellérier, et au moyen de laquelle il a réussi à établir sur des bases encore plus solides les admirables résultats trouvés par Ampère, et que ce savant croyait à l'abri de toute objection, n'imaginant pas qu'on pût lui contester les principes d'où il était parti et qu'il considérait comme des axiomes en mécanique.

Enfin, un mathématicien bien connu par ses belles recherches sur la mécanique céleste et sur la physique mathématique, M. Plana, s'est occupé du même sujet, c'est-à-dire de l'électricité dynamique, après avoir traité, dans un remarquable travail, les questions d'électricité statique que les travaux de Poisson ne lui paraissaient pas avoir suffisamment éclaircies. Je ne puis mieux faire pour donner une idée du point de vue sous lequel il envisage les questions d'électro-dynamiques, que de citer ce qu'il m'écrivait à ce sujet à la fin de décembre 1847 : « La formule d'Ampère est l'expression d'une loi de la nature; j'ignore si elle est *primitive* ou *secondaire;* mais elle renferme une foule de conséquences de la plus haute importance qui ne peuvent être dévoilées que par le *calcul intégral.* Vers le commencement de 1847, j'ai publié à Rome deux opuscules sur ce sujet. Mais je ne pense pas qu'ils puissent être fort recherchés par les physiciens, parce que les difficultés des calculs ne permettent pas de les lire avec agrément. La plus simple des courbes est le cercle; mais ce cercle parcouru par un courant voltaïque devient capable d'exercer une force sur un élément électrique de même nom ou de nom contraire. Eh bien! il faut employer les *transcendantes elliptiques* pour exprimer la résultante de la force émanée de la périphérie du cercle. Mais ce cas fort simple exige des formules dont la connaissance n'est pas en général possédée au point de vue qui est exigé. Le même Ampère n'a pas donné la formule véritable pour le courant circulaire. Celle qu'il donne, savoir : $\frac{n(n-1)}{2}\,\frac{i i' \lambda\lambda'}{r^n+2}$ est fautive; il faut la remplacer par $\frac{n^2-1}{2}\left(\frac{i i' \lambda\lambda'}{r^{n+2}}\right)$[1]. Pour

[1] Nous avons vu que cette erreur ne change rien aux résultats qu'Ampère tire de sa formule.

le *solénoïde*, il faut exécuter l'intégration en retenant plusieurs termes de la série, et alors la difficulté croît énormément. Je l'ai exécutée, mais je n'en suis pas encore assez satisfait. Cela ne m'étonne pas; la simple formule $\frac{A}{r^2}$ de Newton, ne peut être suivie dans ses conséquences sans des calculs épouvantables. Celle d'Ampère, où le coefficient A est variable, présente des difficultés d'un autre genre et même des facilités qui forment parfois un contraste frappant. Les pôles du solénoïde n'ont aucune existence réelle; mais les choses se passent comme s'ils existaient. Lorsqu'on tient compte du seul premier terme dans l'expression de la force qui émane du solénoïde, on croit voir les pôles à l'extrémité; mais un examen plus approfondi modifie cette manière de voir. » Les propres paroles de M. Plana me servent d'excuse si je ne suis pas entré dans plus de détails sur la théorie mathématique de l'action des courants électriques; peut-être même les développements que j'ai donnés auront-ils paru à plusieurs de mes lecteurs trop considérables. Toutefois ils me pardonneront s'ils remarquent qu'il s'agit de l'une des théories les plus importantes de la physique, comme je l'ai dit en commençant cette note. D'ailleurs, je suis heureux d'avoir eu une occasion d'exposer, quoique bien imparfaitement, une partie des travaux de l'un des génies les plus remarquables de notre époque, et de montrer que le temps, loin d'en affaiblir la valeur, semble au contraire l'augmenter toujours plus. On peut dire qu'Ampère a été le Newton de l'électricité.

NOTE G (p. 272).

RÉSULTATS NUMÉRIQUES ET CALCULS RELATIFS AUX EXPÉRIENCES ÉLECTRO-DYNAMIQUES DE WEBER.

L'importance des recherches de Weber sur les mesures électro-dynamiques comme établissant sur des bases expérimentales directes, la théorie d'Ampère, relative à la constitution des aimants, nous engage à donner ici quelques détails additionnels à l'exposition que nous en avons présentée page 268. Les détails portent surtout sur les résultats numériques des expériences qui établissent les lois formulées par Weber.

La première loi, savoir : que *la force électro-dynamique produite par l'action réciproque de deux fils conducteurs qui transmettent des courants d'égale intensité est proportionnelle au carré de cette intensité* est établie par les expériences suivantes. On fait passer par les deux fils du dynamomètre (appareil Weber, fig. 120 et 121) trois courants d'intensités différentes, produits successivement par 3, par 2 et par 1 couples de Grove, et on observe simultanément les déviations du dynamomètre et d'un galvanomètre

mis également dans le circuit. Voici, après qu'on a opéré les réductions nécessaires, les valeurs moyennes des indications des deux instruments :

NOMBRE Des couples.	INDICATIONS Du dynamomètre.	Du galvanomètre.
3	440,038	108,426
2	198,253	72,398
1	50,915	36,332

Ces observations ont été réduites de manière que les premières donnent une mesure de la force électro-dynamique, avec laquelle les deux conducteurs du dynamomètre agissent l'un sur l'autre quand on y fait passer des courants de même intensité, tandis que les secondes donnent une mesure de cette intensité même. Si on désigne par P les indications dynamo-métriques, et par p les indications galvano-métriques, on a $p = 5{,}19534\ \sqrt{P}$; si on calcul en effet d'après cette formule, les valeurs de p au moyen de celles qu'on a obtenues pour P, on a :

$$p = 108{,}144$$
$$72{,}589$$
$$36{,}786$$

nombres qui sont pour les valeurs de p aussi rapprochées de ceux fournis par l'expérience que cela est possible dans les limites d'exactitude que l'expérience comporte. Ainsi, la loi rappelée plus haut est bien le résultat de l'interprétation des données expérimentales.

La seconde loi établie directement par Weber, et qui ne l'avait été que d'une manière indirecte par Ampère, est que *les actions électro-dynamiques sont réglées à distance par les mêmes lois que les magnétiques*. Pour parvenir à cette loi, il faut pouvoir varier la distance de l'anneau mobile par rapport au fixe ; le mobile est dans ce cas extérieur, et on mesure la distance respective des deux anneaux par la distance de leurs deux centres; il faut de plus mesurer l'angle que forme la ligne droite passant par les deux centres avec l'axe de l'anneau mobile; ces deux lignes sont toujours dans le même plan horizontal. On a choisi quatre directions correspondantes aux quatre points cardinaux; ce qui signifie que, si l'axe de l'anneau mobile est supposé être orienté d'après le méridien magnétique, comme le serait l'axe d'une aiguille aimantée, le centre de l'anneau fixe se trouve être dévié par rapport à celui du mobile, tantôt dans la direction du méridien magnétique, soit du sud au nord, soit du nord ou sud, tantôt dans une direction perpendiculaire à ce méridien, de l'ouest à l'est, ou de l'est à l'ouest. Dans chacune de ces quatre directions, les deux anneaux, ou plutôt leurs deux centres, se trouvent disposés à différentes distances l'un de l'autre. On avait soin que le même courant qui traversait le dynamomètre fût transmis également à travers un galvanomètre, afin de pouvoir réduire les observations faites avec le premier instrument à la même intensité du courant, en faisant usage de la première loi déjà démontrée.

Voici un tableau qui présente un résumé abrégé des moyennes réduites à la même intensité, qu'on a obtenues pour les divers cas observés. La première colonne renferme les nombres qui expriment les distances entre les centres des deux anneaux, et les autres ont en tête l'indication de l'angle que forme la ligne droite qui joint les deux centres avec l'axe de l'anneau mobile, orienté dans la direction du méridien magnétique.

DISTANCES en millim.	NORD. 0°	EST. 90°	SUD. 180°	OUEST. 270°
0	22960	22960	22960	22960
300	77,16	189,24	77,06	190,62
400	34,78	77,61	34,77	77,28
500	18,17	39,37	18,30	39,16
600		22,53		22,38

Il est évident que dans le cas où la distance est 0, c'est-à-dire où les centres des deux anneaux coïncident, il ne peut y avoir de différence provenant de l'angle que fait avec l'axe de l'anneau mobile la ligne qui joint les centres des deux anneaux, puisque cette ligne se réduit à un point situé sur l'axe.

Ce tableau nous montre encore que les résultats obtenus pour la même distance, mais dans des directions diamétralement opposées, s'accordent assez entre eux pour qu'on puisse trouver dans cet accord une garantie de l'exactitude dans les observations. En supposant ces valeurs égales deux à deux et en en prenant la moyenne, on obtient le tableau suivant dans lequel les divisions de l'échelle arbitraire sont transformées en degrés, minutes et secondes, R étant la distance, V et V′ étant respectivement les angles de déviation.

R.	V.	V′.
0,3	0° 49′ 22″	0° 20′ 3″
0,4	0° 20′ 8″	0° 9′ 2″
0,5	0° 10′ 12″	0° 4′ 44″
0,6	0° 5′ 50″	

D'après le principe fondamental de l'électro-dynamique, les tangentes des angles de déviation doivent pouvoir se développer suivant les puissances inverses de la distance, ce qui donne :

$$\text{tang. } V = aR^{-3} + bR^{-3}$$
$$\text{tang. } V' = \tfrac{1}{2}aR^{-3} + cR^{-3}.$$

Dans ces formules a, b, c, sont les constantes qui doivent être fournies par l'observation; si donc dans le cas actuel, on suppose :

$$\text{tang. } V = 0{,}0003572\, R^{-3} + 0{,}000002755\, R^{-3}$$
$$\text{tang. } V' = 0{,}0001786\, R^{-3} + 0{,}000001886\, R^{-3}.$$

on obtient le tableau suivant des déviations *calculées* qui ne diffèrent que très-peu des *observées*, ainsi que l'indiquent les troisième et cinquième colonnes qui donnent ces différences.

R.	V.	DIFFÉRENCE.	V'.	DIFFÉRENCE.
0,3	0° 49' 22"	0"	0° 20' 4"	—1"
0,4	0° 20' 7"	+1"	0° 8' 58"	+4"
0,5	0° 10' 8"	+4"	0° 4' 12"	+2"
0,6	0° 5' 49"	+1"		

La méthode employée, qui est exactement la même dont Gauss a fait usage pour mesurer la force magnétique (*Institutiones magneticæ. Annalen* 1833, t. XXVIII, p. 604.), conduisant aux mêmes résultats, permet d'établir directement l'une des conséquences les plus générales et les plus importantes du principe de l'électro-dynamique, savoir : que les mêmes lois règlent les actions électro-dynamiques et magnétiques à distance.

En comparant les actions électro-dynamiques aux actions magnétiques, il a fallu exclure des premières le cas où les centres des deux anneaux du dynamomètre coïncident l'un avec l'autre, puisque ce cas ne peut se réaliser dans l'action mutuelle de deux aimants. Ajoutons encore que dans cette application des lois magnétiques aux lois électro-dynamiques, on peut, au lieu de déduire les valeurs des trois constantes *a*, *b* et *c* des observations mêmes, les obtenir directement par le calcul au moyen du principe fondamental de l'électro-dynamique; car au moyen de ce principe on peut trouver, avec un degré d'approximation suffisant, *le moment de rotation électro-dynamique qu'exerce l'anneau fixe sur l'anneau mobile suspendu par les deux fils, quand on fait passer par les deux anneaux un courant d'une intensité i*. Nous ne reproduisons pas ici la série des calculs par lesquels M. Weber parvient à obtenir des résultats numériques presque identiques à ceux que l'observation directe lui avait fournis dans le premier tableau que nous avons rapporté plus haut pour établir la seconde loi. Nous nous contenterons de donner ce tableau calculé avec l'indication des différences qu'il présente avec les résultats correspondants du tableau obtenu par l'expérience :

DISTANCES en millim.	NORD OU SUD. 0° ou 180°	DIFFÉRENCES.	EST OU OUEST. 90° ou 270°	DIFFÉRENCES.
0	+22680,00	+280,00	+22680,00	+280,00
300	189,03	+0,90	77,47	—0,06
400	77,79	—0,34	34,74	+0,03
500	39,37	—0,10	18,31	—0,07
600	22,64	—0,18		

Dans cette comparaison entre la théorie et l'expérience, un seul facteur a été déduit des observations, et cela parce que, vu sa nature, on ne pouvait obtenir ce facteur d'une manière suffisamment exacte par les mesures directes.

En résumé, nous croyons en avoir assez dit pour faire comprendre l'immense service que M. Weber a rendu à la science, en établissant sur des bases aussi solides les lois de l'électro-dynamique, et en donnant ainsi à la théorie de M. Ampère une certitude presque mathématique.

FIN DU PREMIER VOLUME.

TABLE DES MATIÈRES

DU PREMIER VOLUME.

PREMIÈRE PARTIE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

DEUXIÈME PARTIE.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

TROISIÈME PARTIE.

MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

NOTES

RELATIVES AUX DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES DE QUELQUES POINTS PARTICULIERS.

FIN DE LA TABLE.

Paris. — Imprimerie de GUSTAVE GRATIOT, rue Mazarine, 30.





